

INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSTEKNIK
TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND

DIVISION OF BUILDING TECHNOLOGY
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

INVÄNDIG TILLÄGGSISOLERING KÖLDBRYGGOR, FUKT, RÖRELSER OCH BESTÄNDIGHET

INTERNAL ADDITIONAL INSULATION
THERMAL BRIDGES, MOISTURE PROBLEMS,
MOVEMENTS AND DURABILITY

ANN-CHARLOTTE ANDERSSON

RAPPORT TVBH - 1001

LUND 1979

Dokumentutgivare

Lund Institute of Technology, Div of

Handläggare Building Technology

Dokumentnamn

Rapport

Utgivningsdatum

Dokumentbeteckning

LUTVDG/(TVBH-1001)/

/1-315/(1979)

Ärendebeteckning

Författare

Ann-Charlotte Andersson

Dokumenttitel och undertitel

Invändig tilläggsisolering.

Köldbryggor, fukt, rörelser och beständighet.

Additional Internal Insulation.

Thermal Bridges, Moisture Problems, Movements and Durability.

Referat (sammandrag) The report deals with the problems which may be caused by internal additional insulation of an existing building component.

Problems treated in this report are heat losses through and surface condensation at thermal bridges, condensation in the building components, stresses due to temperature and moisture content variations and possibly frost damage in facade materials.

After internal insulation thermal bridges such as joist connections, inner wall connections and window splays have relatively speaking an increased effect on heat losses through an outer wall. Computer calculations have been made to estimate this effect. Thermal bridges also reduce surface temperatures in a room. This way in some cases increase the risk for surface condensation. The effect is, however, relatively small.

Condensation in a building component is likely to occur if the internal insulation is made without a new vapour barrier. The condensation risk is naturally greatly influenced by the climatic conditions and the moisture capacity of the building materials.

Onedimensional nonstationary calculations of the temperature and moisture field in some building components before and after additional insulation have been made with a computer program.

Referat skrivet av

Author

Förslag till ytterligare nyckelord

Additional insulation, thermal bridges, thermal stresses, moisture, condensation, frost resistance.

Klassifikationssystem och -klass(er)

Indextermer (ange källa)

Omfång

315 p

Övriga bibliografiska uppgifter

Lund 1979

Språk

Swedish

Sekretessuppgifter

ISSN

ISBN

Dokumentet kan erhållas från

Mottagarens uppgifter

Lund Institute of Technology, Div. of
Building Technology

Fack, S-220 07 LUND

Pris

60 S kr

Blankett LU 11:25 1976-07

DOKUMENTDATABLAD enligt SIS 62 10 12

SIS
DB 1

Forts. referat sammandrag

Laboratory investigations of thermal and moisture conditions in two types of walls after thermal insulation have been made.

The effect of driving rain on the moisture content in an outer wall with and without internal insulation has for some cases been calculated. The possible risk for frost damage due to the decreased rate of drying out is discussed. Although internal insulation can be said to affect the frost resistance, other factors surely have greater influence.

For the discussion of stresses due to temperature and moisture variations simple structural elements are used, plates with clamped and free edges, respectively. The temperature field and the moisture content before and after internal insulation have earlier been calculated. These calculations are now used in order to determine the effect of internal insulation on such stresses. Some calculations with the finite element method have also been made in order to study more complex stress fields.

As for thermal stresses, internal insulation affects the stress distribution in a wall rather than the maximum stress. Stresses due to moisture content variations are hardly affected by internal insulation.

INVÄNDIG TILLÄGGSISOLERING

Köldbryggor, fukt, rörelser och beständighet

av

Ann-Charlotte Andersson, civilingenjör, Ld

Akademisk avhandling som för avläggande av
teknologie doktorsexamen vid tekniska fakulteten
vid universitetet i Lund kommer att offentligen
försvaras i hörsal V:A onsdagen den 23 maj 1979
kl 09.15.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553421_0017

INVÄNDIG TILLÄGGSISOLERING KÖLDBRYGGOR, FUKT, RÖRELSER OCH BESTÄNDIGHET

**INTERNAL ADDITIONAL INSULATION
THERMAL BRIDGES, MOISTURE PROBLEMS,
MOVEMENTS AND DURABILITY**

ANN-CHARLOTTE ANDERSSON



INNEHÅLL

Förord	1
Sammanfattning	3
Summary	8
Beteckningar/List of Symbols	13
1 Inledning	17
1.1 Bakgrund	17
1.2 Mål, metodik och begränsningar	22
1.3 Byggnadsdelar i det befintliga beståndet	25
2 Värmeförluster på grund av köldbryggor	29
2.1 Intressanta typer av köldbryggor	29
2.2 Beräkningsmetodik och beräkningsförutsättningar	32
2.3 Diskussion av värmeövergång vid rumsytor	38
2.4 Värmeförluster genom köldbryggor - beräkningsresultat	48
2.5 Uppskattning av värmeförluster genom köldbryggor	57
2.6 Inverkan av köldbryggor på transmissionsförluster genom ytterväggar	61
3 Ytkondensation vid köldbryggor	71
3.1 Tilläggsisoleringens inverkan på temperaturfördelningen vid köldbryggor	71
3.2 Risk för ytkondensation	77
4 Fukttillstånd i tilläggsisolerade konstruktioner - kondensation	83
4.1 Fuktkällor och fukttransportmekanismer	83
4.2 Utgångskonstruktioner	87
4.2.1 Tilläggsisolering av konstruktion utan befintliga ångtäta skikt (typ 1)	90
4.2.2 Tilläggsisolering av konstruktion med befintligt ångtätt skikt på utsidan (typ 2)	91
4.2.3 Tilläggsisolering av konstruktion med befintligt ångtätt skikt på insidan (typ 3)	93
4.3 Inverkan av materialens fuktkapacitet	95
4.4 Inverkan av tilläggsisolering på byggnadsdelar i naturligt klimat	103
4.4.1 Allmänt	103

4.4.2	Yttervägg av 1½-stens tegel	103
4.4.3	Yttervägg av 250 mm gasbetongmurverk	114
4.4.4	Källaryttervägg av 250 mm gasbetong	120
4.4.5	Massivt tak av 200 mm gasbetong	130
4.4.6	Trävägg	132
4.4.7	Diskussion och slutsatser	134
4.5	Kondensation vid gammal ångspärr	137
4.6	Kondensation i elledningar	148
4.7	Förenklad beräkning av årlig fuktbalans	150
5	Experimentella undersökningar	153
5.1	Allmänt	153
5.2	Beskrivning av provvägg och försöksuppläggning	153
5.3	Temperaturmätningar	157
5.3.1	Oisolerad vägg	157
5.3.2	Invändig tilläggsisolering med 5 cm mineralull	165
5.3.3	Invändig tilläggsisolering med 10 cm mineralull	172
5.3.4	Invändig tilläggsisolering med 15 cm mineralull	183
5.4	Kondensation och fuktinnehåll	188
6	Slagregnets inverkan på fukttillståndet och risken för frostskador i tilläggsisolerade ytterväggar	197
6.1	Inledning	197
6.2	Uttorkning efter slagregn	202
6.2.1	Oputsad tegelvägg	203
6.2.2	Putsad gasbetongvägg	212
6.3	Avdunstning vid temperatursänkning	215
6.4	Simulering av frostskador	219
6.4.1	Beskrivning av beräkningsförfarandet	220
6.4.2	Beräkningar med och utan invändig tilläggsisolering	220
6.5	Diskussion och slutsatser	224
7	Temperaturspänningar och -rörelser	227
7.1	Allmänt	227
7.2	Grundläggande spännings- och deformationssamband	228
7.3	Temperaturspänningar och -rörelser i homogena ytterväggar	241
7.3.1	Beräkningsmodeller och -förutsättningar	241
7.3.2	1½-stens tegelvägg	249

7.3.3	250 mm gasbetongvägg	262
7.4	Temperaturspänningar i yttervägg av 1½-stens tegel. Kompletterande beräkningar med finita elementmetoden	268
7.4.1	Spänningar vid randen av en fritt upplagd balk	268
7.4.2	Spänningar vid temperaturgradient i längsriktningen av en fritt upplagd balk	270
7.4.3	Spänningar vid fönsteröppning	272
7.5	Spänningar i ytskikt av puts	275
7.5.1	Puts på icke deformerbart underlag	275
7.5.2	Puts på deformerbart underlag	279
7.6	Spänningar på grund av temperaturskillnader mellan olika delar av byggnadsstommen	284
7.6.1	Allmänt	284
7.6.2	Spänningar beräknade med tvåsträngsmodell	286
8	Spänningar och rörelser på grund av fukthaltsvariationer	291
8.1	Fuktrörelser i byggnadsmaterial	291
8.2	Uppskattning av fuktrörelser och spänningar i 1½-stens tegelvägg	298
8.3	Fuktrörelser och -spänningar i 250 mm gasbetong	298
8.4	Samtidig inverkan av temperatur- och fuktvariationer	305
	Litteratur	313

FÖRORD

Föreliggande rapport behandlar inverkan av tilläggsisolering på temperatur- och fuktförhållanden i befintliga byggnadsdelar och härav orsakade tekniska konsekvenser. De huvudsakliga problem som tas upp är inverkan av köldbryggor på värmeförluster och ytkondensation, kondensationsrisk i byggnadsdelar, eventuellt ökad risk för frostsador på grund av den invändiga isoleringen samt rörelser och spänningar, orsakade av temperatur- och fukthaltsvariationer.

Det är min förhoppning att rapporten skall kunna användas för att uppskatta inverkan av de ovan nämnda problemen i konkreta situationer.

Professor Lars Erik Nevander har initierat arbetet och varit till stor hjälp under dess gång. Lilian Johansson och Lena Thorell har lagt ner ett stort arbete på att få rapporten att se så presentabel ut som möjligt, med figurritning respektive utskrift av manuskriptet. Mina kollegor samt flera personer utanför avdelningen har bidragit med värdefulla synpunkter på arbetet. Statens Råd för Byggnadsforskning har till största delen bekostat forskningsprojektet.

Till alla dessa riktas ett varmt tack.

Lund i mars 1979

Ann-Charlotte Andersson

SAMMANFATTNING

Denna rapport behandlar de byggnadstekniska problem som kan bli följden av invändig tilläggsisolering av en befintlig byggnadsdel.

I inledningen, KAP 1, diskuteras översiktligt inverkan av ut- respektive invändig tilläggsisolering ur fukt- och värmeteknisk synpunkt. Den utvändigt tilläggsisolerade byggnadsdelen blir varmare, inverkan av köldbryggor minskar och risken för fuktproblem är liten. I den invändigt tilläggsisolerade byggnadsdelen är förhållandena de motsatta.

Av de problem som kan tänkas uppstå på grund av tilläggsisolering har följande valts ut för undersökning:

o Köldbryggor

Värmeförluster

Ytkondensation

o Fuktproblem

Fuktbalans och kondensationsrisk i byggnadsdelar

Kondensation vid gammal ångspärr

Inverkan av slagregn - eventuell risk för frostsador

o Spänningar och rörelser

Temperaturspänningar och -rörelser i byggnadsdelar

Temperaturspänningar i putsade ytskikt

Spänningar och rörelser på grund av fukthaltsvariationer i byggnadsdelar

I KAP 2 behandlas inverkan av köldbryggor på värmeförluster genom ytterväggar före och efter tilläggsisolering. Den typ av köldbryggor som behandlas är bjälklags- och innerväggsanslutningar, anslutningar mellan yttervägg och balkongplatta, fönstersmygar samt i någon mån yttervägghörn. Inledningsvis görs en diskussion av värmeövergångsförhållandena vid innerytor.

Köldbryggorna får efter tilläggsisolering ökad inverkan på värmeförlusterna, relativt sett. I ogynnsamma fall kan värmeförlusterna på grund av köldbryggor uppgå till hälften av värmeförlusterna genom ett ytter-

väggsfält. Den starkt ökade relativa inverkan beror delvis på att redovisningen är gjord med väggens yttermått som jämförelsestorhet.

I KAP 2 ges också rekommendationer för hur värmeförluster genom liknande typer av köldbryggor kan uppskattas.

KAP 3 behandlar eventuell risk för ytkondensation på grund av den temperatursänkning som uppstår vid en köldbrygga efter invändig tilläggsisolering. Aktuella ytor är främst fönstersmygar. Av betydelse för risken för ytkondensation är det sätt på vilket anslutningen av isoleringen till smygen görs. Den allmänna slutsatsen blir dock, att trots att temperatursänkningen i en fönstersmyg kan bli ganska stor efter invändig isolering, är risken för ytkondensation mycket liten vid normala klimatförhållanden.

I KAP 4 diskuteras fuktproblem, orsakade av diffusion inifrån , efter invändig tilläggsisolering. För en principdiskussion indelas befintliga konstruktioner med avseende på placering av befintliga ångtäta skikt. De befintliga konstruktionerna förutsätts sedan kunna bli tilläggsisolerade in- eller utvändigt, med eller utan nya ångtäta skikt. Kondensationsrisk finns i en befintlig konstruktion om den tilläggsisoleras invändigt utan nytt ångtätt skikt på insidan. Möjliga kondenserade fukt-mängder blir störst om den befintliga konstruktionen innehåller ett ångtätt skikt.

En kort diskussion, med beräkningsexempel, av fuktkapacitetens inverkan på kondensationsrisken görs därefter. För starkt hygroskopiska material kan det ta mycket lång tid innan fukthaltsökning av betydelse inträffar.

Beräkningar av fuktbalansen i några olika konstruktioner före och efter tilläggsisolering har gjorts med ett datorprogram för ickestationär endimensionell värme- och fukttransport, utvecklat av Sandberg (1973).

De klimatförutsättningar som väljs för beräkningarna har stor betydelse för fuktbalansen i olika konstruktioner. Invändig tilläggsisolering utan ångspärr medför alltid ökat fukttinnehåll jämfört med tillståndet före isoleringen. I vissa fall, då materialen är starkt hygroskopiska, går fukthaltsökningen mycket långsamt. Trots detta rekommenderas, med hänsyn

till de osäkerheter som alltid förekommer vid den här typen av beräkningar, att ångspärr generellt används vid invändig tilläggsisolering av ytterväggar.

I fallet källarytterväggar, där man måste ta hänsyn till risken att markfukt belastar väggen, är det svårare att ge generella rekommendationer för tilläggsisolering. Allmänt gäller att belastningen av markfukt på väggen bör vara obetydlig för att invändig tilläggsisolering problemfritt skall kunna göras. Invändig isolering skapar temperaturskillnad mellan befintlig vägg och inneluft, vilket periodvis kan hindra uttorkning inåt. Då man bedömer att uttorkning av markfukt och eventuellt kondenserad fukt måste kunna ske inåt, bör isoleringen göras ganska tunn och utan ångspärr.

Kondensationsrisk vid gammal ångspärr behandlas som ett stationärt problem. Ett antal diagram ges, med vilka man kan uppskatta tillåtet värmemotstånd hos en invändig tilläggsisolering då den befintliga konstruktionen har en gammal ångspärr. Förhållandet mellan värmemotstånden hos befintlig konstruktion och tilläggsisolering ligger i allmänhet i närheten av 1 vid normala inomhusklimat. Temperatursänkningen i ytterväggshörn ger dock ökad risk för kondensation mot den gamla ångspärren.

KAP 4 avslutas med jämförelse mellan en enkel metod att uppskatta fuktbalansen i en konstruktion med liten fuktkapacitet och datorberäkningar.

I KAP 5 beskrivs laboratoriemätningar av temperatur- och fuktförhållanden i $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg och 250 mm gasbetongvägg. Temperaturmätningar vid köldbryggor jämförs med tvådimensionella stationära datorberäkningar. I fönstersmygar har temperaturmätningar gjorts med och utan fönstersmygisolering. Temperatursänkningen i en fönstersmyg är avsevärd då ytterväggen isoleras invändigt, förutsatt låg utetemperatur och lågt värmemotstånd hos befintlig konstruktion.

Kondensation i befintliga elledningar kan troligen vara ett allvarligt problem om anslutning mellan nya elurtag och befintliga ledningar görs genom isoleringen och inneluft kan passera in i den gamla ledningen. Kondensation bakom fönstersmygisolering kan förekomma om ny ångspärr inte dras in över smygens ytor. Ytkondensation i smygar bör emellertid inte vara vanligt förekommande vid ej alltför extrema klimatsituationer.

I KAP 6 diskuteras slagregnets inverkan på fukttillståndet i ytterväggar med och utan invändig tilläggsisolering. Datorberäkningar har gjorts av uttorkning efter slagregn för några olika fall. En invändig tilläggsisolering påverkar i de flesta fall uttorkningshastigheten relativt lite, jämfört med många andra faktorer. Vid kraftiga, upprepade slagregn kan man emellertid tänka sig att fukthalten i den tilläggsisolerade väggen successivt ökar mera än i den oisolerade väggen.

För att få en uppfattning av om den något ökade fukthalten och den sänkta temperaturen i en invändigt tilläggsisolerad vägg kan ha någon inverkan på frostbeständigheten för exempelvis en tegelvägg har några datorberäkningar gjorts för simulerade klimatsituationer. Fukttransporten beskrivs dock ganska summariskt.

För att frostsador skall kunna uppkomma krävs dels dålig frostbeständighet hos fasadmaterialet, mycket kraftig fukttillförsel samt frysning medan fukthalten ännu är hög. Invändig tilläggsisolering förefaller kunna ha en viss inverkan på frostsaderisken, men inverkan av värmetransporten inifrån är säkert marginell jämfört med fasadmaterialets egenskaper och klimatpåverkan utifrån.

I KAP 7 behandlas tilläggsisoleringens inverkan på temperaturspänningar i ytterväggar. Ytterväggarna har behandlats som enkla konstruktionselement, plattor med fria respektive med oförskjutbara ränder. För några olika dygn under ett år har det ickestationära, endimensionella temperaturfältet beräknats. Spänningar och rörelser på grund av temperaturvariationerna har sedan beräknats för väggar med och utan invändig tilläggsisolering. Jämförelse mellan förhållandena i väggar med och utan tilläggsisolering visar att tilläggsisoleringen kan inverka på spänningsfördelningen i väggen, men knappast på extremvärden av temperaturspänningarna.

Några kompletterande beräkningar av temperaturspänningar har också gjorts med finita elementmetoden.

Avslutningsvis görs en diskussion av förhållandena vid temperaturskillnader mellan olika delar av en byggnadsstomme. Temperaturskillnad mellan yttervägg och innervägg kan ge stora skjuvspänningar vid anslutningen

mellan väggarna. I detta fall kan den medeltemperatursänkning som invändig tilläggsisolering ger i en yttervägg vara av betydelse för sprickrisken i innerväggen.

KAP 8, slutligen, behandlar spänningar och rörelser på grund av fukthaltsvariationer i ytterväggar med och utan tilläggsisolering på i princip samma sätt som temperaturspänningar. Som underlag för beräkningar av förhållandena i en gasbetongvägg används fuktbalansberäkningar från KAP 4. I detta fall har utvändig tilläggsisolering också betraktats på grund av den eventuella risken att uttorkning efter utvändig isolering kan öka förekomsten av krympsprickor. I allmänhet är spänningar på grund av fuktvariationer ganska små jämfört med temperaturspänningar. Tilläggsisoleringens inverkan på dessa spänningar kan troligen förutsättas vara ganska marginell.

KAP 8 avslutas med ett försök att behandla sammanlagd inverkan av fukt- och temperaturvariationer på spänningar och rörelser i ytterväggar. De faktorer som inverkar på tecken och storlek hos spänningarna är, förutom de rent byggnadsstatiska förutsättningarna, bland annat placering av värmeisolering och ångtäta skikt. Förhållandena är ofta så komplexa att man inte med säkerhet kan uttala sig om när fukt- och temperaturspänningar samverkar respektive motverkar varandra.

SUMMARY

This report deals with the technical problems which may be caused by internal additional insulation of an existing building component.

In the introduction, CHAP 1, the effect of external and internal additional insulation is discussed from humidity and thermo-technical points of view. The building component that is additionally insulated externally becomes warmer, the effect of thermal bridges is reduced and the risk for moisture problems is small. Conditions are the opposite when the building components are additionally insulated internally.

Of the problems which may arise from additional insulation the following were chosen for investigation:

- o Thermal bridges

- Heat losses

- Surface condensation

- o Moisture problems

- Moisture balance and condensation risks in building components

- Condensation at old vapour barriers

- Effect of driving rain - possible risk for frost damage

- o Stresses and movements

- Thermal stresses and temperature movements in building components

- Thermal stresses in plastered surface layers

- Stresses and movements due to different moisture contents in the building components

CHAP 2 deals with the effect of thermal bridges on heat losses through the outer walls, before and after additional insulation. The types of thermal bridges dealt with are the connections between outer walls and joists or inner walls, those between outer walls and balcony slabs, window splays and, to a certain extent, also outer wall corners. The introduction begins with a discussion about the heat transfer conditions at internal surfaces.

Relatively speaking the thermal bridges have an increased effect on the heat losses after additional insulation. In unfavourable conditions heat losses due to thermal bridges may account for half of the heat losses

through an outer wall area. The greatly increased relative influence partly depends on the fact that the external dimensions of the wall is used as the reference magnitude.

In CHAP 2 recommendations for the estimation of heat losses through similar types of thermal bridges are also given.

CHAP 3 deals with possible risks for surface condensation due to the temperature reduction that occurs at a thermal bridge after internal additional insulation. The surfaces concerned are first and foremost window splays. The way in which the insulation is applied to the splays is important where the risk for surface condensation is concerned. However, the usual result is that, in spite of the fact that the temperature reduction in a window splay may be quite considerable after internal insulation, the risk for surface condensation is very small in normal climatic conditions.

The moisture problem caused by diffusion from the inside after internal additional insulation is discussed in CHAP 4. For a discussion of principle, the existing constructions are grouped according to the placing of the existing vapour barriers. It is then assumed that the existing constructions will be internally or externally additionally insulated, with or without new vapour barriers. There is a risk for condensation if the internal additional insulation is applied to existing constructions without a new vapour barrier on the inside. The amount of condensation will be greatest if the existing construction contains a vapour barrier.

A short discussion, including calculation examples, concerning the effect of the moisture capacity on the risk for condensation follows. Where greatly hygroscopic material is concerned it may take a very long time before moisture content increases of any importance occur.

Calculations of the moisture balance in different constructions before and after additional insulation have been made with a computer program for non-stationary one dimensional heat and moisture transports - developed by Sandberg (1973).

The climatic conditions chosen for the calculations are of great importance where the moisture balance in different constructions is concerned. Internal additional insulation without a vapour barrier always results in an in-

creased moisture content compared with the condition before the insulation was applied. The increase in moisture content is very slow in some cases where the material is very hygroscopic. Taking into consideration the uncertainties which are always present in this type of calculations, it is still recommended that vapour barriers should be used when external walls are additionally insulated on the inside.

In the case of external cellar walls, where one has to bear in mind the risk that soil moisture affects the walls, it is more difficult to lay down any general recommendations regarding additional insulation. Generally speaking the effect of the soil moisture on the wall should be negligible if internal additional insulation is to be carried out without any problems occurring. Internal insulation causes a temperature difference between the original wall and the inside air. This may periodically prevent drying out inwards. The insulation should be rather thin and without a vapour barrier in cases when drying out of soil moisture and any condensed moisture has to take place inwards.

The risk for condensation at old vapour barriers is treated as a stationary problem. A number of diagrams are shown by which it is possible to estimate the heat resistance permitted in internal additional insulation when there is an old vapour barrier in the existing construction. The ratio between the heat resistance in an existing construction and additional insulation is usually around 1 in a normal indoor climate. The temperature reduction in the outer wall corners consequently increases the risk for condensation at the old vapour barrier.

CHAP 4 concludes with a comparison between a simple method for estimating the moisture balance in a construction with a low moisture capacity and computer calculations.

Laboratory measurements of temperature and moisture conditions in a 38 cm brick wall and a 250 mm porous concrete wall are described in CHAP 5. The temperature measurements at the thermal bridges are compared with two-dimensional stationary computer calculations. Where window splays are concerned the temperatures were measured in cases both with and without window splay insulation. The temperature reduction in a window splay is considerable when the outer wall is internally insulated, providing the outdoor temperature is low and the heat resistance of the existing construc-

tion is also low.

Condensation in existing electric cables will probably be a serious problem if the new electric sockets and the existing conduits are connected through the insulation and air from the inside enters into the old conduits. Condensation behind the window splay insulation may occur if new vapour barriers are not fitted over the surface of the splay. However, surface condensation in splays should not normally occur in climatic conditions which are not too extreme.

The effect of driving rain on the moisture content in outer walls with and without internal additional insulation is discussed in CHAP 6. Computer calculations of the drying out after driving rain have been made in a few different cases. In most cases internal additional insulation affects the rate of drying out relatively little compared with many other factors. However, in the case of repeated driving rain one can expect the moisture content in the additionally insulated wall to increase gradually and to a greater extent than in an uninsulated wall.

Some computer calculations for simulated climatic conditions have been made in order to find out whether the slightly increased moisture content and the reduced temperature in a wall with internal additional insulation can have any effect on the frost resistance of a brick wall, for example.

In order for frost damage to occur it is necessary that the frost resistance of the facade material is poor, that a great amount of moisture is supplied and that freezing occurs whilst the moisture content is still high. Internal additional insulation seems to have a certain effect on the risks for frost damage, but the effect of heat transport from inside is definitely marginal compared with the characteristics of the facade material and the climatic influences from outside.

CHAP 7 deals with the effect of additional insulation on temperature stresses in outer walls. The outer walls have been treated as simple structural elements, slabs with free and clamped edges, respectively. The nonstationary, onedimensional temperature field was calculated for different 24 hourly periods during one year. Stresses and movements caused by temperature variations were then calculated for walls both with and without internal additional insulation. The comparisons between the conditions in

the walls with and without additional insulation show that extra insulation can affect the stress distribution in the wall but not to the extent of extreme temperature stress values.

Some supplementary calculations of temperature stresses using the finite element method have also been made.

A discussion regarding the circumstances when there are temperature differences between the different parts of the building frame, concludes the chapter. Temperature differences between outer and inner walls may cause great shearing stresses at the connection between the walls. In this case the average temperature reduction that the internal additional insulation can cause in an outer wall is of importance where the risk for cracking in the inner wall is concerned.

Finally, CHAP 8 deals with stresses and movements due to moisture content variations in outer walls with and without extra insulation, in principle in the same way as temperature stresses.

Moisture balance calculations from CHAP 4 are used as a basis for calculating the conditions in a porous concrete wall. In this case external additional insulation was also studied because of the possible risk that drying out after external insulation might increase the occurrence of shrinkage cracks. As a rule stresses due to moisture variations are relatively small compared to temperature stresses. The effect of additional insulation on these stresses can probably be assumed to be marginal.

CHAP 8 concludes with an attempt to deal with the total effect of moisture and temperature variations on stresses and movements in outer walls. The factors affecting the signs and size of the stresses are, apart from the purely building statics conditions, amongst other things the placing of heat insulation and vapour barriers. The conditions are often so complicated that it is not possible to state definitely where moisture and temperature stresses cooperate with or counteract each other.

BETECKNINGAR/LIST OF SYMBOLS

A	yta/area	m^2
a	termisk diffusivitet/thermal diffusivity	m^2/s
a	absorptans/absorptivity	-
b	bredd/width	m
C_s	strålningskonstant för svart yta/ radiation constant for a black surface	$5,775 \text{ W/m}^2\text{K}$
c_p	specifik värmekapacitet/specific heat capacity	$\text{J/kg} \cdot \text{K}$
D	diffusivitet/vapour diffusivity	m^2/s
d	tjocklek/thickness	m
E	elasticitetsmodul/modulus of elasticity	Pa
F	synfaktor/view factor	-
FT	fukttillskott/difference between indoor and outdoor vapour concentration	kg/m^3
G	fuktföde/moisture flow rate	kg/s
G	skjuvmodul/shear modulus	Pa
g	fuktfödestäthet/density of moisture flow rate	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
g	tyngdacceleration/acceleration of free fall	$9,81 \text{ m/s}^2$
h	höjd/height	m
I	strålning/radiation intensity	W/m^2
I	ytröghetsmoment/second moment of plane area	m^4
k	värmeegenomgångskoefficient/heat transmission coefficient	$\text{W/m}^2\text{K}$
L	luftföde/air flow	$m^3/m^2 \cdot \text{s}$
l	längd/length	m
M	moment/moment	Nm
m	värmemotstånd/heat resistance	$m^2\text{K/W}$
N	normalkraft/normal force	
N	nederbörds mängd/amount of precipitation	kg/m^2
n	axiell last/normal force per unit of length	N/m
P	punktlast/point load	N
p_s	lufttryck/air pressure	Pa
p	linjelast/line load	N/m
Q	värme flöde/heat flow	W
Q	ortsvärminingsbehov/degree days	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$
q	värme flödestäthet/density of heat flow rate	W/m^2 eller W/m
q_e	extra värme flöde/extra heat flow	W/mK
q	utbredd last/distributed load	N/m^2

r	radie/radius	m
r	omvandlingsvärme/conversion heat	J/kg
S	vattenmättnadsgrad/degree of saturation	-
S	slagregnmängd/amount of driving rain	kg/m ²
s	förskjutning per kraftenhet/displacement per unit of force	m/N
T	temperatur/temperature	K
u	hastighet/velocity	m/s
u	fuktkvot/moisture content	kg/kg
u	förskjutning/displacement	m
V	volym/volume	m ³
v	ånghalt/vapour concentration	kg/m ³
v _S	mättnadsånghalt/maximum vapour concentration	kg/m ³
w	fukthalt/moisture content	kg/m ³
w	utböjning/deflection	m
z	ånggenomgångsmotstånd/vapour resistance	s/m
α	värmeövergångskoefficient/surface coefficient of heat transfer	W/m ² K
α	temperaturutvidgningskoefficient/coefficient of linear expansion	K ⁻¹
α	koefficient använd vid spänningsberäkning med strängmodell/coefficient used for calculations with the stringer method	-
β	diffusionsövergångskoefficient/surface coefficient of mass transfer	m/s
β	volymutvidgningskoefficient/coefficient of cubical expansion	K ⁻¹
γ, ρ	densitet/density	kg/m ³
γ	skjuvvinkel/shear strain	-
δ	ånggenomsläpplighetskoefficient/coefficient of vapour conductivity	m ² /s
ε	töjning/strain	-
ε	emittans/emissivity	-
η	dynamisk viskositet/dynamic viscosity	Ns/m ²
θ	temperatur/temperature	°C

λ	värmekonduktivitet/thermal conductivity	W/mK
ν	Poisson's tal/Poisson's ratio	-
ν	kinematisk viskositet/ kinematic viscosity	m ² /s
ξ	relativ fuktkapacitet/ relative moisture capacity	kg/kg, kg/m ³
ρ	krökningsradie/radius of curvature	m
σ	spänning, allmänt/stress, general	Pa
τ	skjuvspänning/shear stress	Pa
ϕ	relativ fuktighet/relative humidity	%
Gr	Grashofs tal/Grashof number	-
Nu	Nusselts tal/Nusselt number	-
Pr	Prandtls tal/Prandtl number	-
Re	Reynolds tal/Reynold number	-

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Den så kallade energikrisen under eldningssäsongen 1973/74 medförde en ökad insikt hos olika grupper i samhället om nödvändigheten att spara energi, bland annat i bostäder och övriga uppvärmda byggnader. Detta har lett till kraftigt skärpta bestämmelser i Svensk Byggnorm för värmeisolering av nybebyggelse. Den största delen av byggnadsbeståndet är emellertid det befintliga. För att få till stånd energibesparande åtgärder i den befintliga bebyggelsen har man ännu så länge gått fram på frivillighetens väg, genom att med lån och bidrag göra energibesparande åtgärder mera lönsamma (eller mindre olönsamma) privatekonomiskt.

Detta medför att förbättring av värmeisoleringen hos befintliga byggnadsdelar, tilläggsisolering, kommer att bli betydligt vanligare i framtiden även om man tidigare också haft anledning att tilläggsisolera byggnader för att få bättre inomhusklimat eller lägre energiförbrukning.

Tilläggsisolering, som den i allmänhet utformas nu, är en ganska ny typ av byggnadsteknik. Denna teknik kan medföra speciella problem, beroende på hur den befintliga byggnadsdelen är uppbyggd, var isoleringen placeras och hur den utformas. Komplettering av en befintlig byggnadsdel med ett nytt värmeisolerande skikt medför alltid att byggnadsdelens balans med omgivande klimat ändras på något sätt.

I det följande ges en översiktlig beskrivning av principiell inverkan av en tilläggsisolering på en byggnadsdel med avseende på byggnadsfysikaliska konsekvenser.

En värmeisolering som placeras på utsidan respektive insidan av en befintlig konstruktion har helt olika inverkan på byggnadsdelen, även om den medför minskat värmeflöde i båda fallen. Då tilläggsisoleringen görs invändigt, måste isoleringen brytas vid anslutningar till t ex bjälklag och innerväggar. Vid anslutningen uppkommer eller förstärks en köldbrygga. Köldbryggan medför ökade värmeförluster samt ojämn temperaturfördelning med låg invändig ytemperatur vid själva köldbryggan. Den utvändiga tilläggsisoleringen minskar däremot i de allra flesta fall inverkan av befintliga köldbryggor. Det finns undantag från detta, vilket diskuteras längre fram. En utvändig tilläggsisolering medför dock generellt

större energibesparing än en invändig, vid samma isolertjocklek.

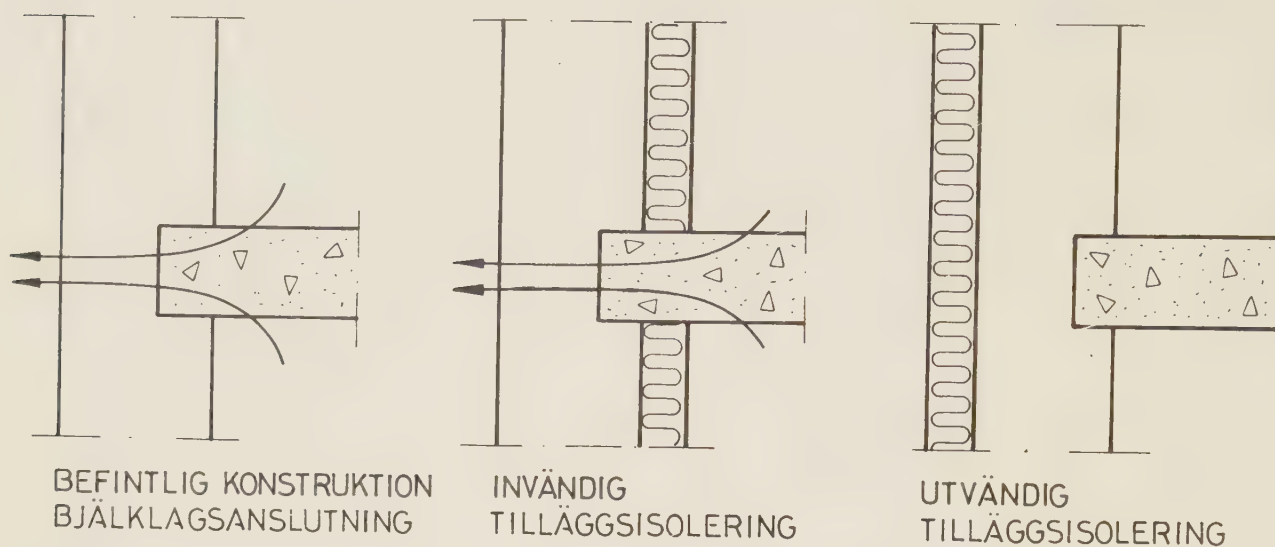


FIG 1.1. Inverkan av invändig och utvändig tilläggsisolering på köldbryggeeffekter. Pilarna visar schematiskt värmeflödets riktning.

Vintertid, då utetemperaturen är låg, medför en utvändig tilläggsisolering alltid höjd temperatur i den gamla byggnadsdelen, medan en invändig tilläggsisolering har motsatt inverkan. Sommartid är skillnaden liten.

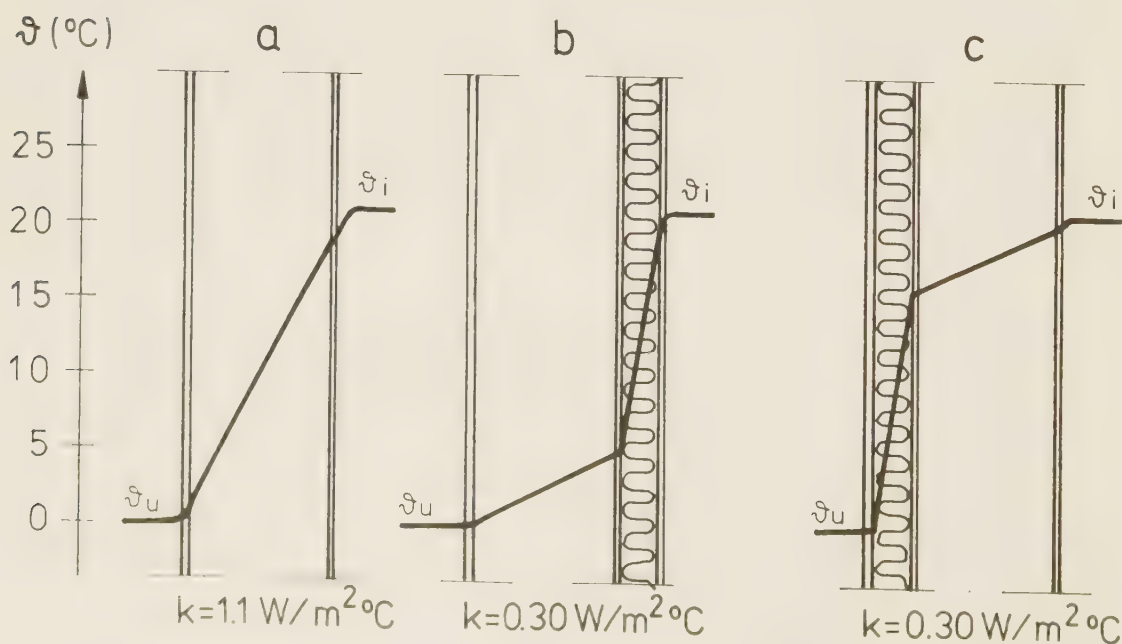


FIG 1.2. Temperaturfördelning under stationära förhållanden vintertid i a) oisolerad vägg, b) samma vägg som i a) med invändig tilläggsisolering ($m_{\text{isol}} = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$), c) med utvändig tilläggsisolering.

Vid jämförelse mellan den invändigt och den utvändigt isolerade konstruktionens temperaturförhållanden är det icke stationära fallet ofta intressant. I FIG 1.3 visas en temperaturberäkning för en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg, oisolerad, utvändigt isolerad och invändigt isolerad. Isoleringens inverkan har approximerats med ett värmeövergångsmotstånd, $m = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$. Ett sommarygn och ett vinterdygn har betraktats. Utetemperaturen har antagits variera sinusformat över dygnet, och är en s_k ekvivalent utetemperatur, med inverkan av instrålning mot väggen. Den temperatur som visas i FIG 1.3 är temperaturen mitt i tegelväggen.

Temperaturen i den utvändigt isolerade väggen påverkas i båda fallen ganska lite av utetemperaturens variation. Förloppet är dock inte periodiskt, som i de andra väggarna, eftersom temperaturen ökar svagt under hela dygnet.

I vinterfallet har den invändigt isolerade väggen betydligt lägre temperatur än den oisolerade. I sommarfallet är temperaturskillnaden mellan de båda väggarna liten. Amplituden för svängningen i betraktat snitt är något större i den invändigt isolerade väggen än i den oisolerade.

Byggnadens användning och uppvärmningssystemets funktion avgör vilket av verkningssätten som är att föredra. För en byggnad som används intermittent kan invändig isolering vara fördelaktig eftersom uppvärmning går snabbt. I en lokal med tidvis stort vämetillskott, t ex från instrålning eller olika aktiviteter i lokalen kan utvändig isolering vara fördelaktig ur komfortsynpunkt, eftersom väggarna kan magasinera värmeöverskottet så att innetemperaturen påverkas i ganska liten grad.

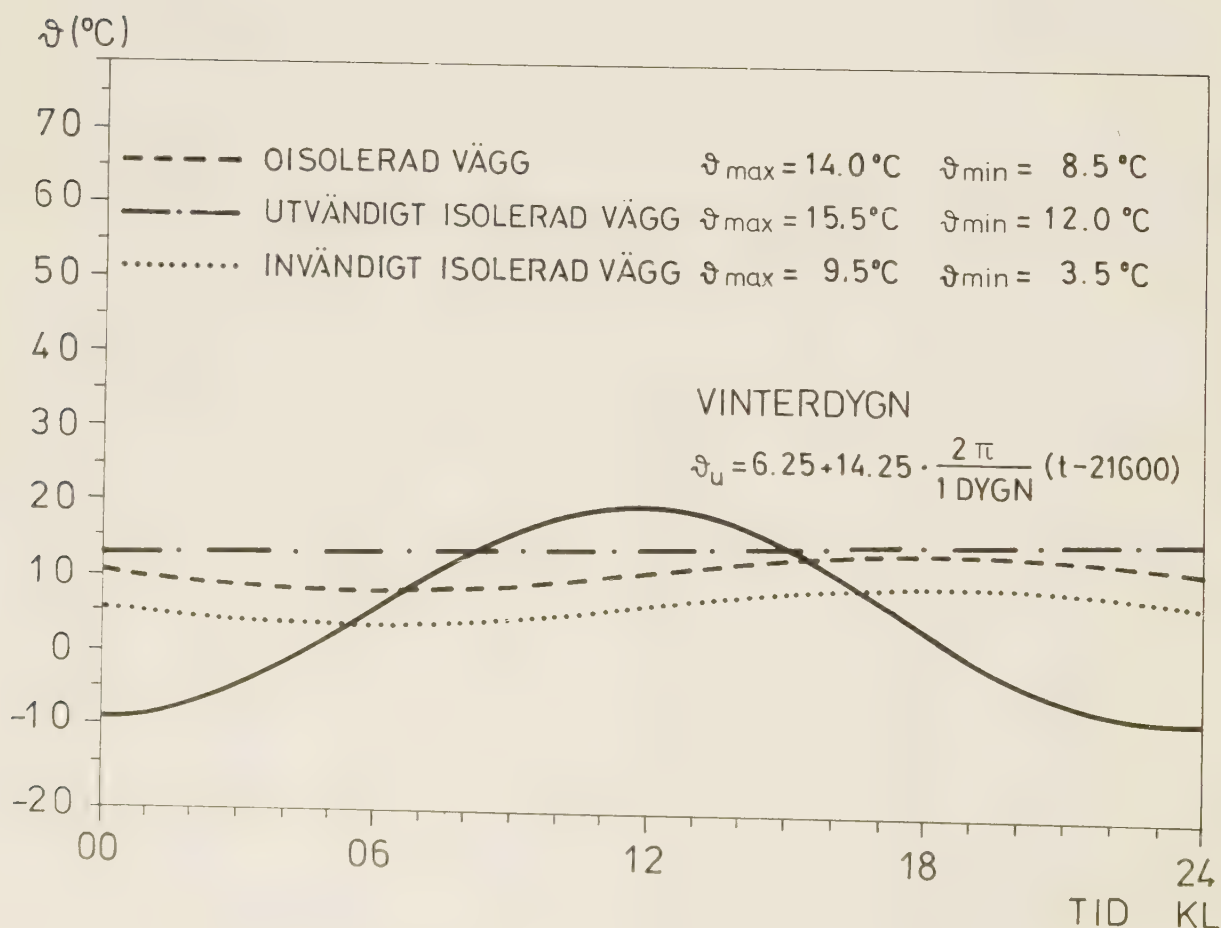
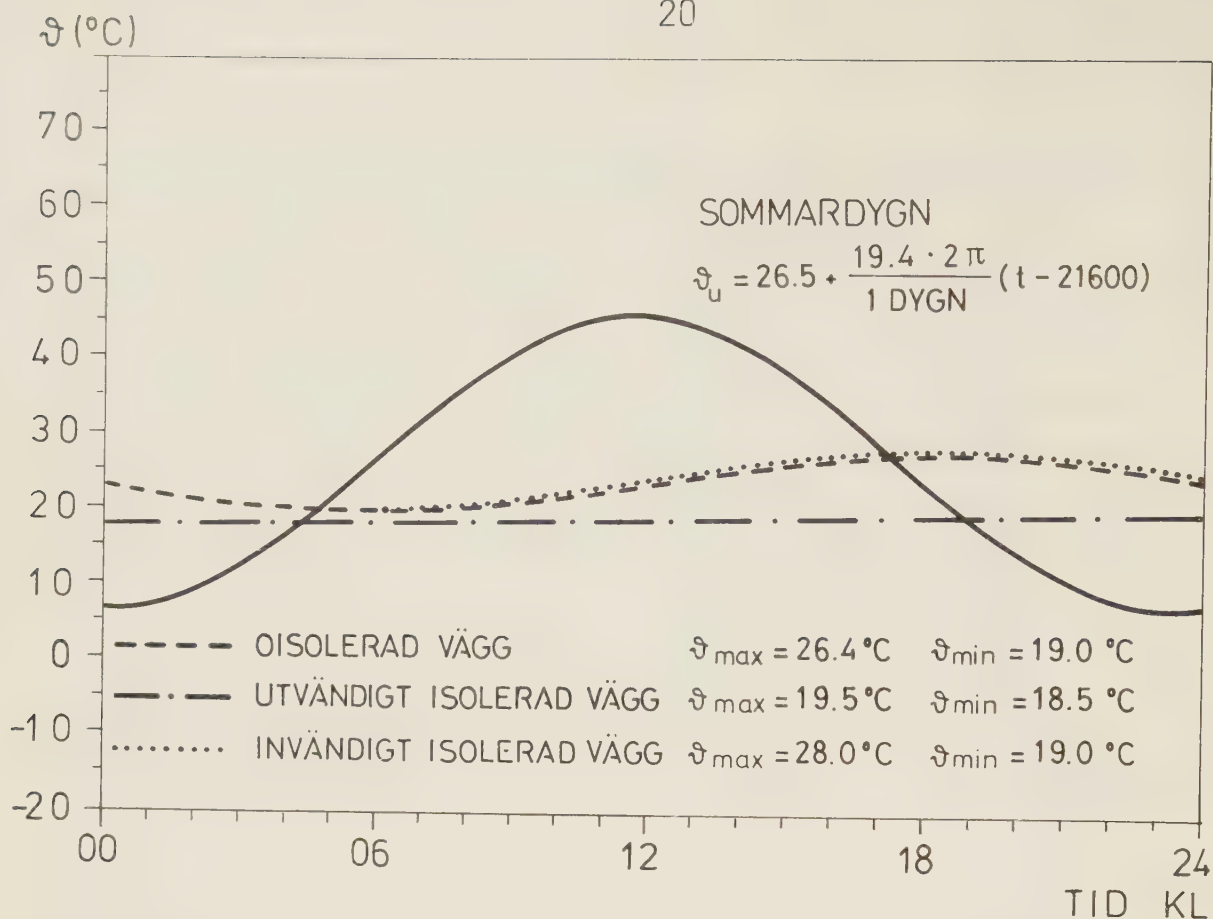


FIG 1.3. Temperaturförlopp under ett sommardygn och ett vinterdygn i mitten av en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg, oislerad, med invändig isolering med 10 cm mineralull samt med utvändig isolering med 10 cm mineralull.

Exemplet visar att den invändigt tilläggsisolerade konstruktionen blir utsatt för större temperaturvariationer under året och under dygnet än den utvändigt isolerade och den oisolerade. Detta kan leda till att temperaturspänningar och -deformationer ökar vid invändig tilläggsisolering.

Det finns också risk för att invändig tilläggsisolering kan medföra fuktproblem i en byggnadsdel. Sänkt temperatur i ett material medför ökning av fukttätheten. En enkel förklaring till detta kan fås genom att betrakta FIG 1.4, som innehåller två kurvor som är centrala vid kvalitativ bedömning av fukttransport. Den ena visar temperaturberoendet hos luftens mättnadsånghalt och den andra är en schematisk sorptionskurva för ett byggnadsmaterial. Sorptionskurvans temperaturberoende är litet och kan i regel försummas.

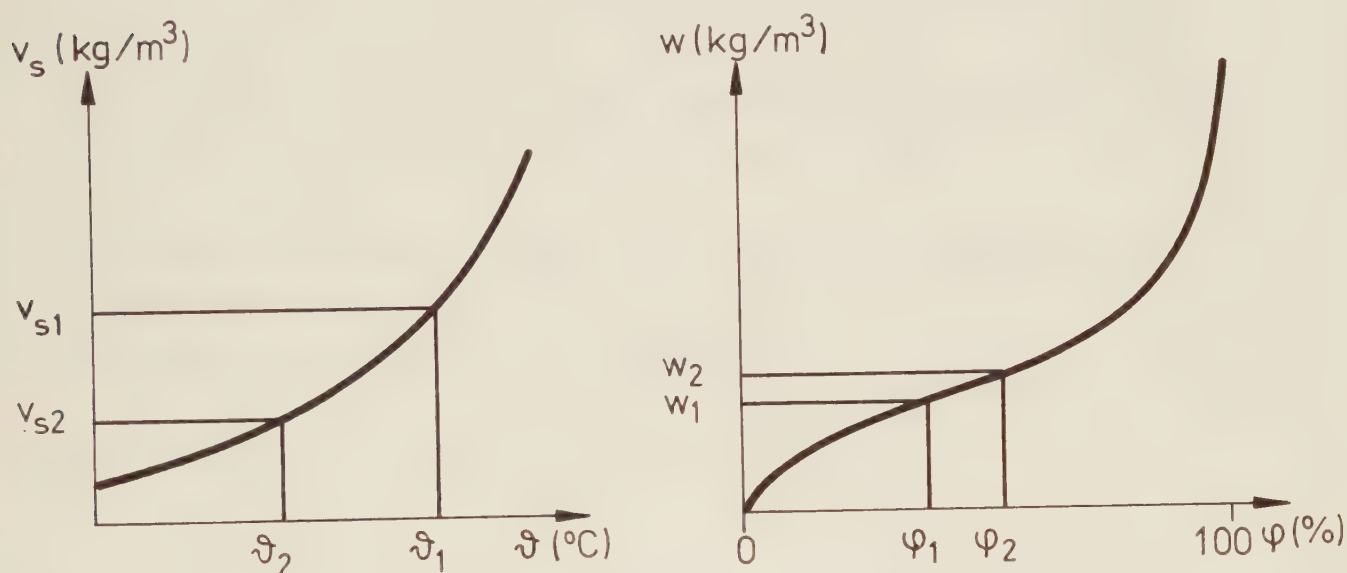


FIG 1.4. a) Temperaturberoendet hos luftens mättnadsånghalt, b) schematisk sorptionskurva för ett material.

Exempel

Betrakta ett material som är i jämvikt med sin omgivning. Temperaturen i materialet är θ_1 och motsvaras av mättnadsånghalten v_{s1} . Relativa fuktigheten i materialet är $\phi_1 = v/v_{s1}$, där v är ånghalten. Materialet har enligt sorptionskurvan fukthalten w_1 . Temperaturen i materialet

sänks till θ_2 . Omgivningen är oförändrad. Materialet är nu inte längre i jämvikt med omgivningen. Mättnadsånghalten är $v_{s2} < v_{s1}$. Sluttillståndet blir relativa fuktigheten $\phi_2 = v/v_{s2}$ och fukthalten $w_2 > w_1$. ϕ och w kan emellertid inte ändras momentant. Ånghalten i materialet sjunker efter temperaturändringen. Diffusion in i materialet kan då ske, och fortgår tills ånghalten åter är lika med v och sluttillståndet uppnått.

På samma sätt medför temperaturhöjning uttorkning av ett material.

Om temperaturen är så låg att mättnadsånghalten sjunker till ånghaltens nivå kan kondensation inträffa.

Kondensationsrisk finns också vid inbyggnad av en gammal ångspärr som efter invändig tilläggsisolering kommer att ligga kallt.

Temperatursänkningen vid köldbryggor efter invändig tilläggsisolering kan öka risken för ytkondensation.

Eftersom den invändigt tilläggsisolerade byggnadsdelens temperatur sjunker kommer uttorkningen av väggen efter ett slagregn att gå långsammare. Slagregn kan ge betydligt högre fuktinnehåll i en byggnadsdel än kondensation. Kombinationen av något ökad fukthalt och sänkt temperatur bör, rent statistiskt sett, kunna öka risken för frostsador på en invändigt tilläggsisolerad byggnadsdel.

Den uttorkning av den utvändigt isolerade byggnadsdelen som kan äga rum kan medföra bättre värmeisoleringsförmåga. Det kan dock finnas risk för krympning, och i den mån denna är förhindrad, spänningar som i värsta fall kan leda till sprickbildning.

En annan konsekvens av tilläggsisolering är, att vid isolering av grundkonstruktioner minskar värmeflödet till marken. Detta medför att frostnedträngningen i marken kring byggnaden ökar. Om undergrunden innehåller tjälfarlig jordart kan byggnaden skadas.

1.2 MÅL, METODIK OCH BEGRÄNSNINGAR

Syftet med undersökningen är att behandla de problem som kan bli följden av tilläggsisolering av befintliga byggnadsdelar.

Av det tidigare resonemanget framgår att det i de allra flesta fall är invändig tilläggsisolering som kan medföra tekniska problem. Det finns många andra aspekter än rent tekniska på valet mellan in- och utvändig tilläggsisolering. För ytterväggar i flerfamiljshus väljs oftast utvändig isolering. Invändig isolering kan emellertid vara enda alternativet då husets fasad inte får förändras. Det kan också bli aktuellt i samband med invändig renovering av lägenheter. Aspekter av denna typ samt ekonomiska konsekvenser av tilläggsisolering behandlas inte i undersökningen.

Det praktiska målet för arbetet kan formuleras som "att undersöka och, där det låter sig göras, kvantifiera de konsekvenser som kan bli följden av invändig tilläggsisolering av en byggnadsdel". I många fall blir det då fråga om att jämföra tillståndet hos en byggnadsdel före och efter tilläggsisolering. Där kunskaper om materialegenskaper eller randvillkor för beräkningar saknas kan endast relativa svar ges på frågan om invändig tilläggsisolering medför tekniska problem.

Utvändig tilläggsisolering har endast diskuterats i undantagsfall.

De huvudsakliga problem som har studerats är:

o Köldbryggor

Värmeförluster

Ytkondensation

o Fuktproblem

Fuktbalans och kondensationsrisk i byggnadsdelar

Kondensation vid gammal ångspärr

Inverkan av slagregn - eventuell risk för frostsador

o Spänningar och rörelser

Temperaturspänningar och -rörelser i byggnadsdelar

Temperaturspänningar i putsade ytskikt

Spänningar och rörelser på grund av fukthaltsvariationer i byggnadsdelar

Frågan om inverkan av ökad frostnedträngning och därmed risk för tjäl-sador på grundkonstruktioner har inte behandlats, eftersom det tidigare

gjorts ganska omfattande undersökningar av detta, se t ex Adamson (1977).

Spänningar på grund av temperatur- och fukthaltsvariationer har undersökts genom teoretiska beräkningar. Köldbryggeeffekter och fuktproblem har undersöks genom laboratiemätningar och teoretiska beräkningar.

Det är rimligt att förutsätta att de negativa konsekvenser som eventuellt blir följden av en invändig isolering, ökar med isoleringens värmemotstånd (tjocklek). Den gamla väggens temperatur blir lägre ju tjockare isoleringen är. I många fall har beräkningar, och därmed uppskattningar av risken för eventuella skador, endast gjorts för en isolertjocklek, i allmänhet 100 mm mineralull ($\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$). I FIG 1.5 visas inverkan av invändig tilläggsisolering på medeltemperaturen i en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg vid olika utetemperatur. Stationära förhållanden har förutsatts. Av figuren framgår att skillnaden mellan olika isolertjocklekar i detta avseende inte är särskilt stor om den gamla väggens värmemotstånd är lågt.

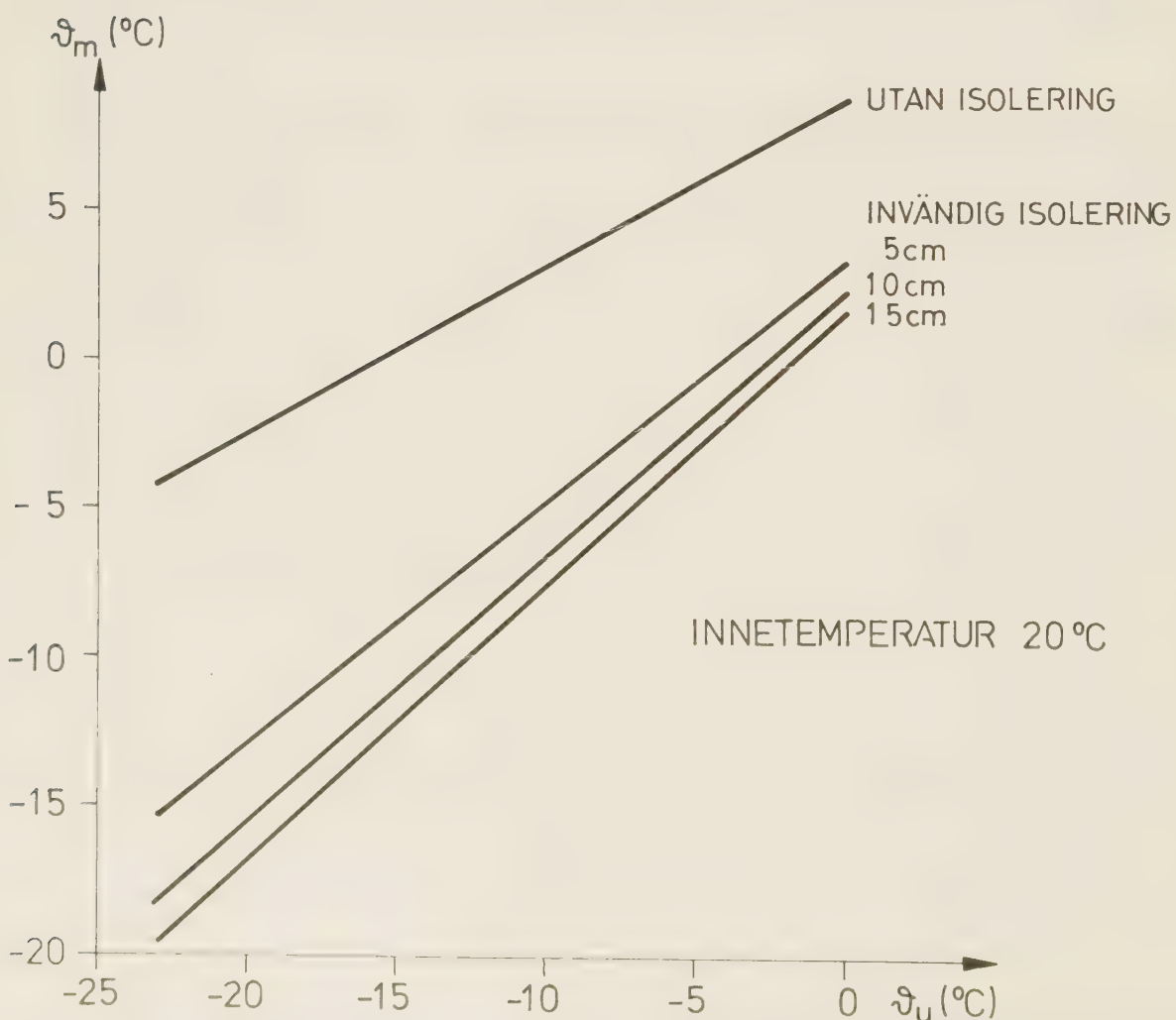


FIG 1.5. Medeltemperatur i $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg vid olika utetemperatur och invändig isolering. Stationära förhållanden.

I nästa avsnitt berörs kortfattat underlaget för tilläggsisoleringen, de gamla byggnadskonstruktionerna. Det byggnadsbestånd som i första hand har ansetts intressant är flerfamiljshus från första hälften av 1900-talet.

1.3 BYGGNADSDELAR I DET BEFINTLIGA BESTANDET

I FIG 1.5 visas schematiskt för ett hus var och hur en tilläggsisolering kan göras. Tilläggsisolering kan i princip vara aktuellt för varje byggnadsdel som avgränsar utrymmen med olika temperatur.

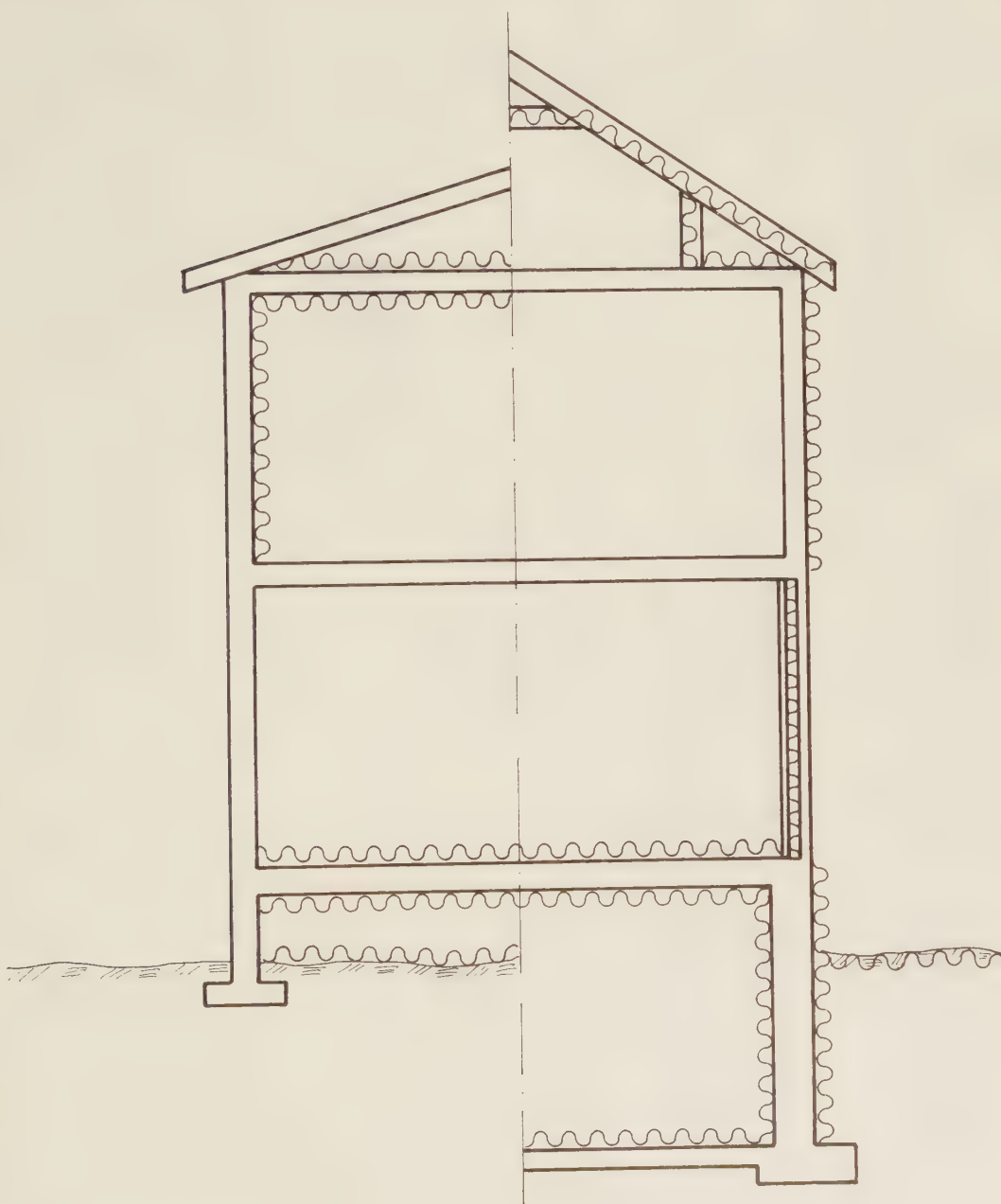


FIG 1.5. Alternativ för tilläggsisolering av en byggnad.

I många fall gäller principiellt samma resonemang för flera olika typer av byggnadsdelar med olika ingående material. Kvantitativa beräkningar kan däremot endast göras för en bestämd konstruktion i ett bestämt klimat. Det är därför nödvändigt att välja ut ett antal byggnadsdelar för exemplifiering av konsekvenser.

De byggnadsdelar som oftast är aktuella för tilläggsisolering är ytterväggar och vindsbjälklag. Härav är ytterväggen den byggnadsdel som det är rimligast att tänka sig kan bli invändigt isolerad. Alla de ovan diskuterade problemen kan bli aktuella för ytterväggar. De konstruktioner som diskuteras i fortsättningen är därför i de allra flesta fall ytterväggar. Exempel på andra konstruktioner kan emellertid också förekomma.

Byggnadsmaterial och -konstruktioner i hus från 1880 - 1940 har ingående behandlats av Bjerking (1974). Exempel på väggtyper under olika tidsperioder visas i FIG 1.7 och 1.8.

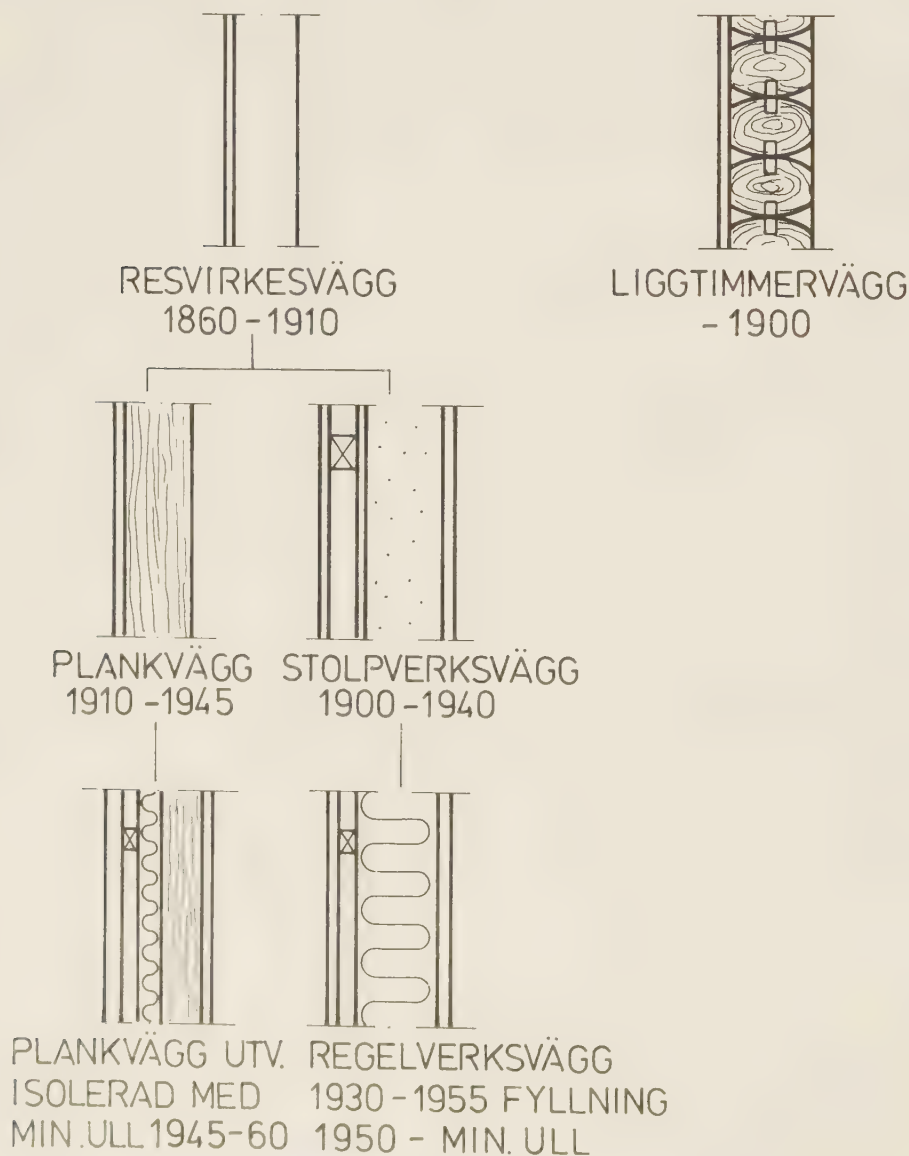


FIG 1.7. Utvecklingen av träväggar, ca 1860-1960.

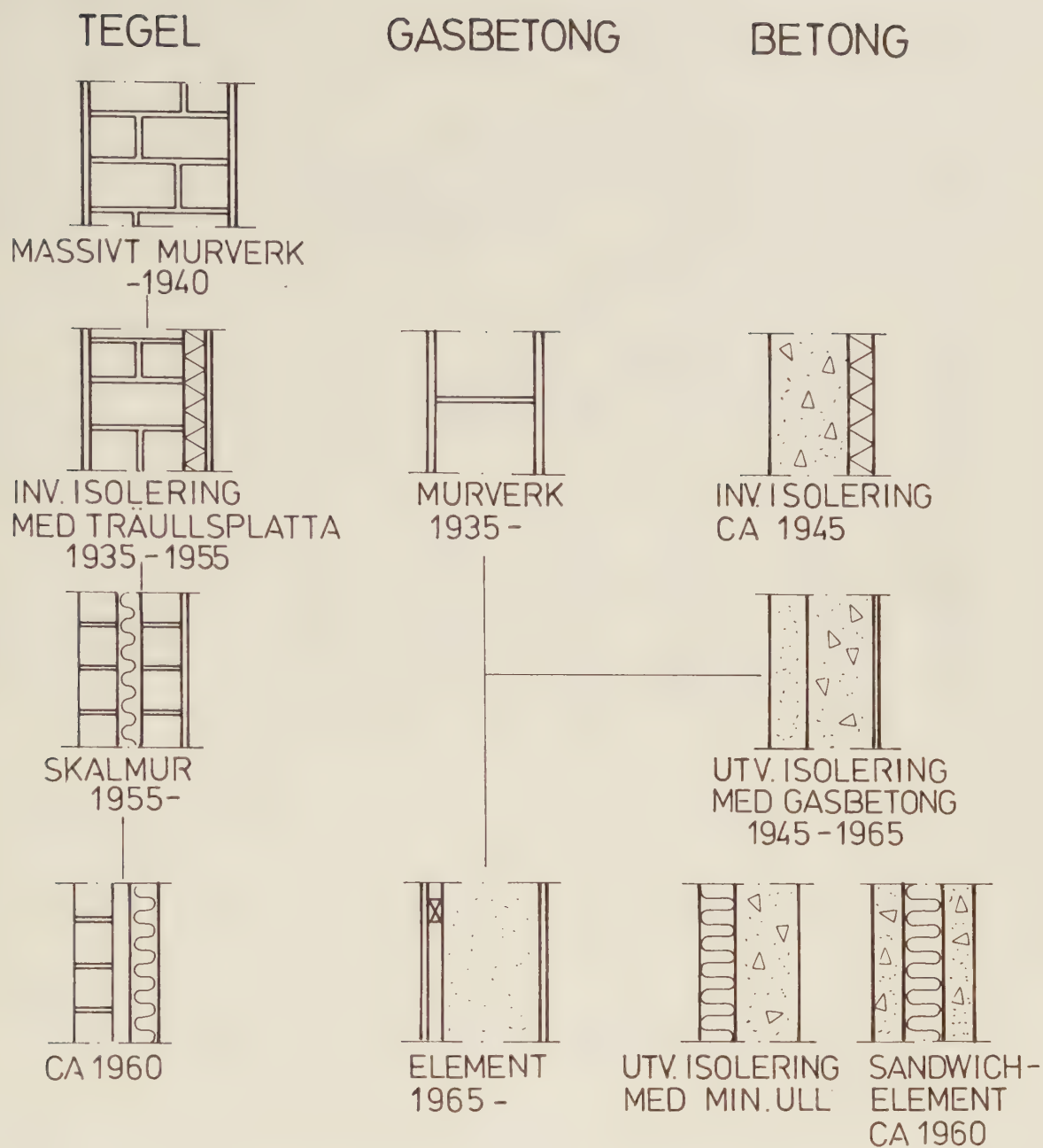


FIG 1.8. Utvecklingen av stenväggar, ca 1860 - 1960.

I flerfamiljshus fram till ca 1940 är stenväggar, företrädesvis av tegel men också av gasbetong de absolut dominerande, vilket framgår av FIG 1.9.

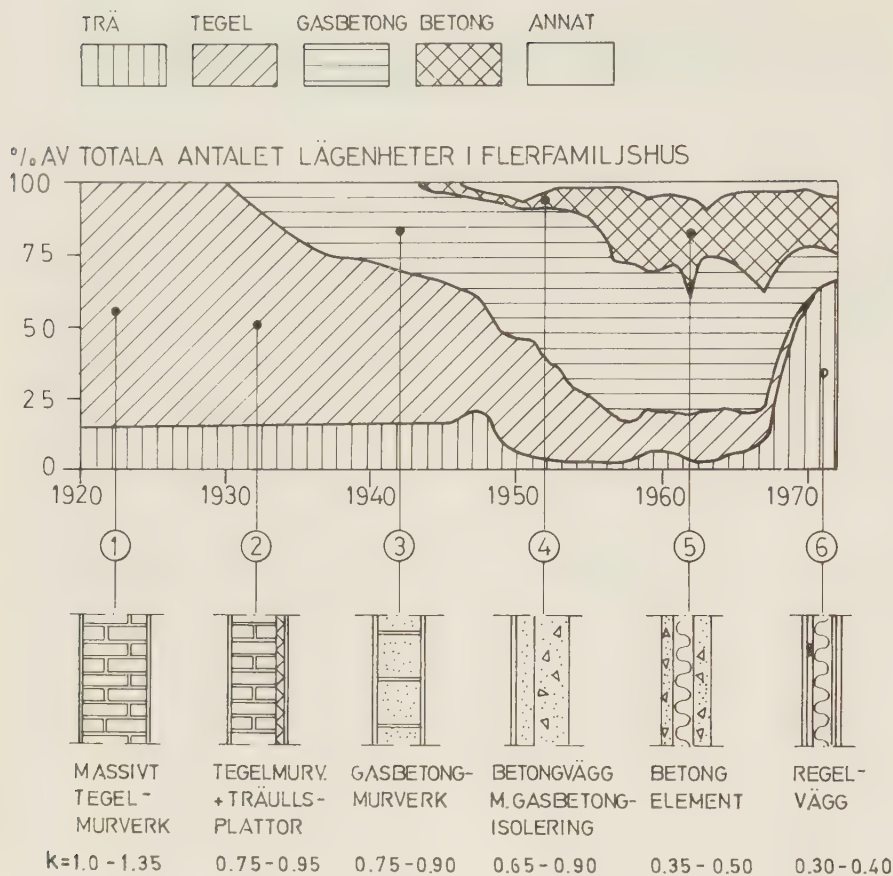


FIG 1.9. Huvudsakligt material i ytterväggar i flerfamiljshus. Källa: Höglund och Johnsson (1976).

Speciellt typiska och därför intressanta, är den massiva tegelväggen, $1\frac{1}{2}$ -stens eller 2-stens murverk och den murade gasbetongväggen, 250 - 300 mm tjock.

2 VÄRMEFÖRLUSTER PÅ GRUND AV KÖLDBRYGGOR

Innehållet i kapitlen 2 och 3, som behandlar köldbryggeeffekter vid invändig tilläggsisolering har tidigare redovisats, se Andersson (1978). Här görs ett relativt utförligt referat av denna rapport. Redovisningen av gjorda beräkningar har dock begränsats.

2.1 INTRESSANTA TYPER AV KÖLDBRYGGOR

Med en köldbrygga menas allmänt en konstruktionsdetalj där ett material med låg värmeisoleringsförmåga bryter igenom ett med hög värmeisoleringsförmåga. Det finns också en annan typ, s k geometrisk köldbrygga, där den rent geometriska utformningen medför flerdimensionell värmeströmning.

De köldbryggor som behandlas här är anslutningar mellan yttervägg och en annan byggnadsdel, där en invändig isolering inte kan dras förbi. Sådana köldbryggor är anslutningar till innerväggar, bjälklag och balkongplattor samt fönster- och dörrsmygar. Ytterväggshörn behandlas också.

Undersökningen har begränsats till fyra ytterväggstyper:

- A. $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg
- B. 1-stens tegelvägg invändigt isolerad med 50 mm träullsplatta
- C. Vägg av murade gasbetongblock, 250 mm
- D. 150 mm betongvägg utvändigt isolerad med 100 mm gasbetong.

FIG 2.1 - 2.4 visar för vilka köldbryggetyper, utom ytterväggshörn, beräkningar har gjorts.

Bjälklagen består i de flesta fall av 16 cm betongplatta med upplag i väggen och något övergolv. Ett bjälklag av trä har också tagits med, för att se vilken storleksordning inverkan har. Av samma anledning har också tagits med en anslutning mellan en trävägg och ett träbjälklag.

För balkongplattor har antagits ett mycket enkelt utseende, en 16 cm betongplatta som är genomgående och kragar ut 1 m utanför ytterväggen. I de flesta fall har bjälklaget antagits vara isolerat på undersidan med träullsplatta.

I alla fönstersmyggar har antagits en 10 cm bred trækarm. Karmen har antagits centriskt placerad i väggarna, utom för den invändigt trälls-
platteisolerade tegelväggen där karmen satts centriskt i tegeldelen.

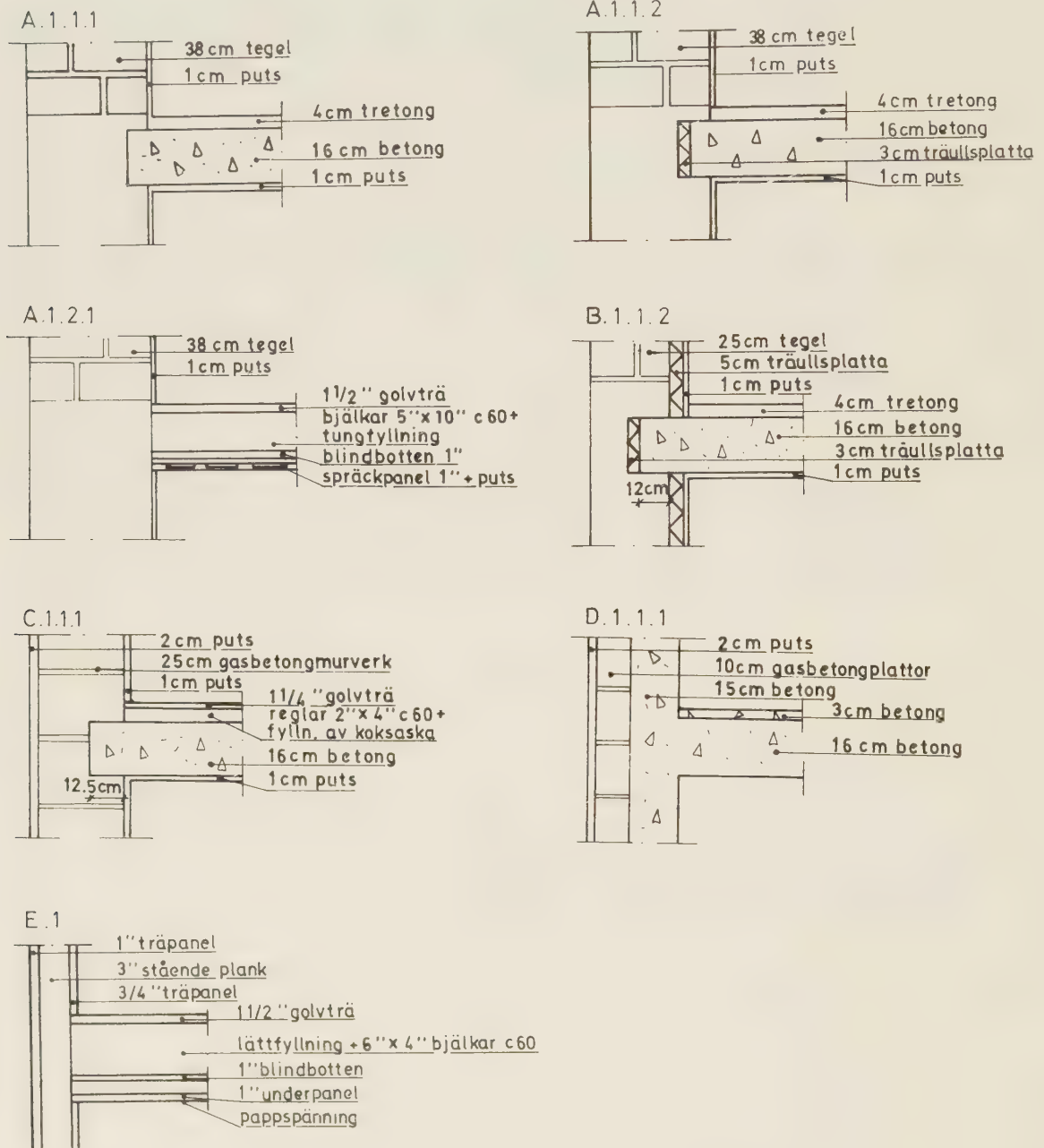
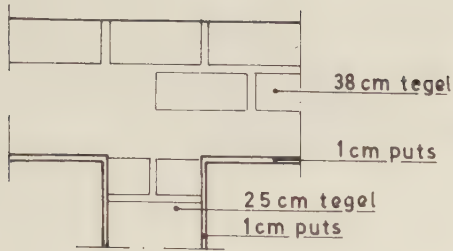
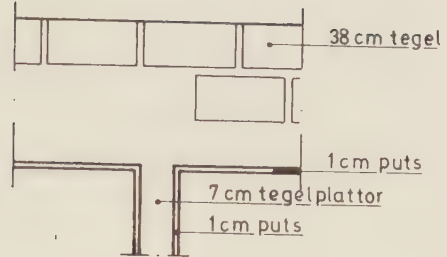


FIG 2.1. Bjälklagsanslutningar - beräkningsalternativ.

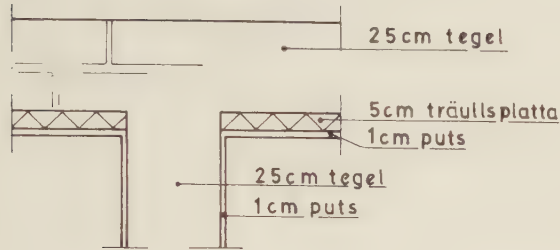
A.2.1.1



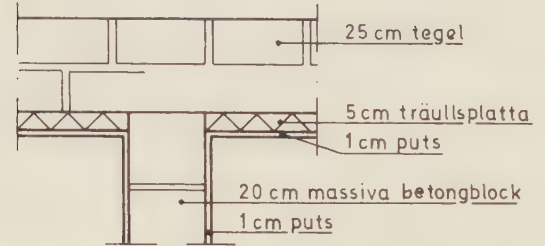
A.2.2.1



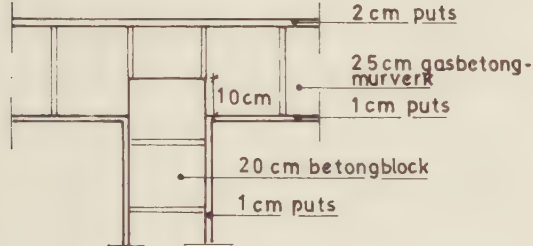
B.2.1.1



B.2.2.1



C.2.1.1



D.2.1.1

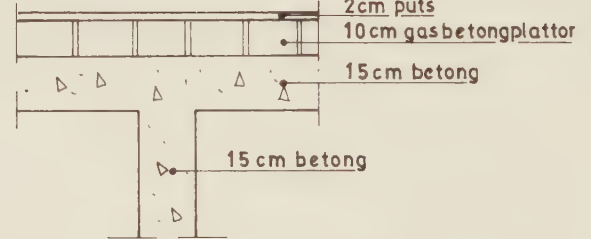
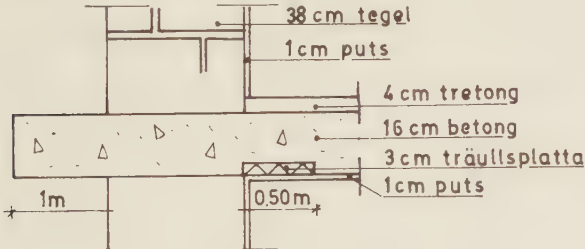
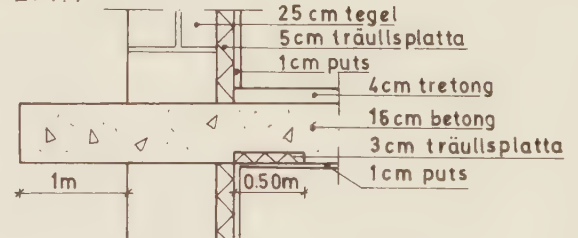


FIG 2.2. Innerväggsanslutningar - beräkningsalternativ.

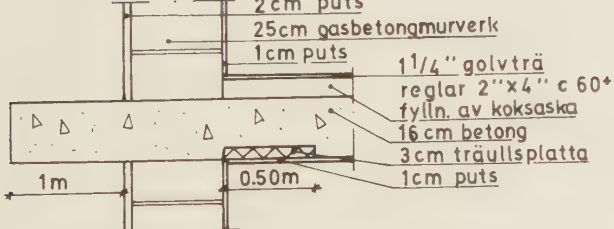
A.4.1



B.4.1



C.4.1



D.4.1

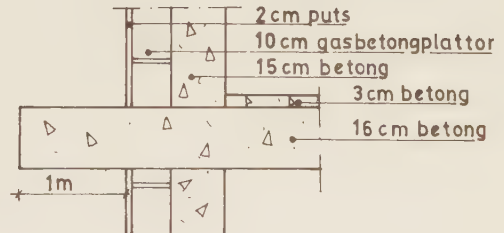


FIG 2.3. Balkongplattor - beräkningsalternativ.

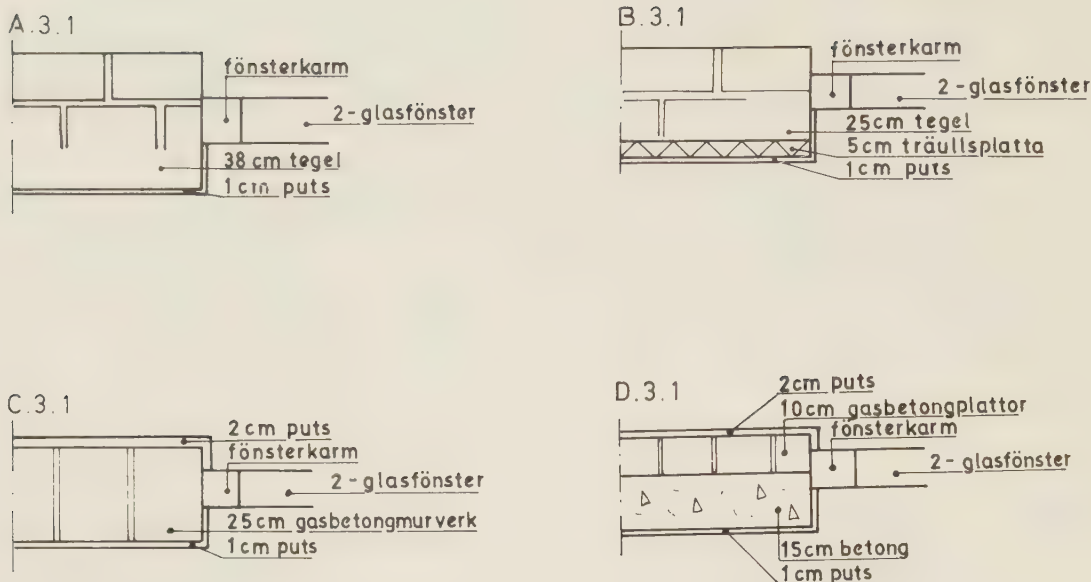


FIG 2.4. Fönstersmygar - beräkningsalternativ.

2.2 BERÄKNINGSMETODIK OCH BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

Vid köldbryggor är värmeströmningen flerdimensionell. I det allmänna fallet är värmeströmningen också icke-stationär eftersom ute- och innetemperatur ständigt varierar. Vid de beräkningar som har gjorts för denna rapport har emellertid förutsatts stationär värmeströmning. Inverkan av icke-stationära förlopp kan alltså inte säkert bedömas, men är förmodligen av liten betydelse då det gäller jämförande beräkningar av värmeförluster genom köldbryggorna. I hörn där tre byggnadsdelar möts, som i en takvinkel eller golvvinkel är värmeströmningen tredimensionell. De tredimensionella effekterna har försumrats här, vilket troligen betyder att värmeförlusterna har underskattats något samt att yttemperaturerna i sådana hörn är lägre än de som fås om beräkningen görs tvådimensionellt. Förutsättningen för en tvådimensionell beräkning är också att ett snitt genom köldbryggan ser likadant ut oberoende av var det läggs, dvs att materialskikten är homogena i sina plan. Detta medför att vissa approximationer måste göras, vilket diskuteras senare.

För tvådimensionell stationär värmeströmning gäller Laplaces differentialekvation

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} = 0$$

där

ϑ är strömningens drivande potential, i detta fall temperaturen, och x och y är koordinater.

En analytisk lösning av denna ekvation är praktiskt omöjlig utom för mycket enkla fall, och man måste därför använda en numerisk metod. Den vanligast använda är relaxationsmetoden, men även finita elementmetoder kan användas för denna typ av problem. De beräkningar som redovisas i denna rapport är alla gjorda med relaxationsmetoden. Några förberedande beräkningar gjordes med finita elementmetoden men denna visade sig vara mera tidskrävande för dessa enkla typer av konstruktioner och randvillkor, och övergavs därför.

Relaxationsmetoden innebär ett differensräkningsförfarande. Konstruktionen delas in i rutnät med varje ruta representerande en cell med en viss temperatur i mitten. Cellen är i temperaturjämvikt med omgivande celler och för varje cell erhålls ett jämviktsvillkor, som vid stationära förhållanden är att summan av värmeflödet till cellen från de omgivande cellerna är lika med 0. Det finns ett flertal utvecklade dataprogram för lösning av sådana problem. Beräkningarna i denna rapport är gjorda med ett program, som utvecklats av Brodén (1969).

I alla beräkningar har förutsatts konstant ute- och innelufttemperatur. Vid beräkning av värmeflödet genom köldbryggorna är det betydelselöst vilka omgivande temperaturer som väljs, eftersom värmeflödet alltid kan anges per en grads temperaturskillnad, genom att dividera med temperaturskillnaden mellan inne- och uteluften. Vid beräkning av yttemperaturerna är det emellertid intressant att göra beräkningarna vid några bestämda temperaturförhållanden. Här har valts innelufttemperaturen $+20^{\circ}\text{C}$ och utelufttemperaturen -20°C . Yttemperaturer vid andra ute- eller innelufttemperaturer kan givetvis lätt erhållas om de är kända vid de angivna temperaturförhållandena.

Om ϑ_0 är temperaturen i en punkt vid innetemperaturen $+20^{\circ}\text{C}$ och utetemperaturen -20°C erhålls temperaturen i samma punkt, ϑ_0' vid inne- och utetemperaturen ϑ_i respektive ϑ_u ur

$$\frac{20 - \vartheta_0}{20 - (-20)} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_0'}{\vartheta_i - \vartheta_u} \quad \text{vilket ger}$$

$$\vartheta_0' = \vartheta_i - (20 - \vartheta_0) \frac{(\vartheta_i - \vartheta_u)}{40}$$

I TAB 2.1. visas vilka värmeledningstal som använts vid beräkningarna. Dessa är i allmänhet hämtade från Svensk Byggnorm 67 eftersom de värden som finns i kommentarer till SBN 1977:3 inte var fastställda då beräkningarna gjordes.

För tilläggsisoleringen har antagits att isoleringsmaterialet ligger i ett regelverk, och att regelandelen är 6% av isoleringens yta. Med isoleringsmaterialets värmeledningstal lika med 0,041 W/mK och reglarnas lika med 0,14 W/mK fås ett resulterande värmeledningstal för tilläggsisoleringen som är 0,047 W/mK. Detta resulterande värmeledningstal har genomgående använts för tilläggsisoleringen, eftersom man på detta sätt slipper göra en tredimensionell beräkning. De fel som denna förenkling ger i beräkningen kan bedömas som små.

För tegelmurverk har i alla beräkningar förutsatts värmeledningstalet 0,58 W/mK. Detta motsvarar t ex murverk av fulltegel med densiteten 1600 kg/m³ eller murverk av håltegel med densiteten 1400 kg/m³.

För murverk av gasbetongblock har använts värmeledningstalet 0,22 W/mK vilket gäller för densiteten 510 kg/m³. Denna kvalitet började dock inte användas förrän ca 1950. Tidigare användes murverk av block med densiteten 600 - 700 kg/m³, vilka har högre värmeledningstal.

TABELL 2.1. Värmeledningsförmåga för olika material

Material	λ (W/mK)
Tegelmurverk	0,58
Gasbetongmurverk	0,22
Betong	1,75
Träullsplatta	0,08
Trä	0,14
Kalkbruk	0,93
Kalkcementbruk	1,04
Mineralull + reglar, regelandel 6%	0,047
Gasbetong (utvändig isolering, $\gamma = 400 \text{ kg/m}^3$)	0,14
Tretong (sågspånsbetong)	0,46
Tegelplattor	0,34
Tung fyllning	0,23
Murverk av massiva betongblock	1,16

Värmeövergången vid en yta beskrivs med värmeövergångskoefficienten, α , eller värmeövergångsmotståndet, m , mellan vilka sambandet $\alpha = 1/m$ gäller. Värmeövergången är sammansatt av en del som beror på strålningen mot omgivande ytor och en del som beror på luftrörelser vid ytan, konvektion.

Värmetransporten mellan en yta och omgivande luft p g a konvektion kan uttryckas som

$$q_k = \alpha_k (\vartheta_y - \vartheta_l)$$

där

q_k = värmetransporten p g a konvektion, W/m^2

α_k = konvektionsövergångskoefficienten, $\text{W/m}^2\text{K}$

ϑ_y = ytans temperatur, K eller $^{\circ}\text{C}$

ϑ_l = luftens temperatur på avstånd från ytan, K eller $^{\circ}\text{C}$

För konvektionsövergångskoefficienten är man hänvisad till experimentella resultat vilka uttrycks med hjälp av dimensionslösa tal för att vara så allmängiltiga som möjligt.

Strålningstransporten mellan en yta och dess omgivning brukar också uttryckas med en värmeövergångskoefficient, α_s .

En yta i ett rum påverkas av strålning från alla i rummet befintliga ytor. Det totala strålningsutbytet för en yta A_0 i ett rum med n st motstrålande ytor med respektive temperaturer och emissionstal $T_1, T_2, \dots, T_n$ och $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ kan skrivas som

$$Q = C_s \cdot A_0 \sum_{i=1}^n \epsilon_{oi} F_{oi} \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 \right]$$

där ϵ_{oi} = resulterande emissionstalet mellan yta o och i

F_{oi} = synfaktorn från yta o till yta i

En skenbar övergångskoefficient p g a strålning kan sedan definieras genom att man sätter

$$\alpha_s = \frac{Q}{A_0 \cdot \Delta\vartheta}$$

Q definieras av uttrycket ovan och $\Delta\vartheta$ sätts ofta lika med $\vartheta_0 - \vartheta_1$ där ϑ_1 är omgivande lufts temperatur. Man sätter ju ofta totala värmeövergångskoefficienten lika med $\alpha_s + \alpha_k$ och då måste både α_s och α_k vara relaterade till samma temperaturskillnad, skillnaden mellan ytans temperatur och omgivande lufts temperatur. Man brukar emellertid ofta definiera α_s i förhållande till en medelstrålningstemperatur hos omgivande ytor. Om övergångskoefficienten relaterad till en medelstrålningstemperatur, ϑ_m , kallas α'_s blir sambandet mellan de två övergångskoefficienterna

$$\alpha_s = \alpha'_s \cdot \frac{\vartheta_m - \vartheta_y}{\vartheta_1 - \vartheta_y}$$

där

ϑ_y = ytans temperatur

ϑ_1 = luftens temperatur

ϑ_m = medelstrålningstemperaturen hos omgivande yta

Om alla motstrålande ytor har samma temperatur och emissionstal kan man

för en yta sätta

$$\alpha_s = 0,04 \cdot \epsilon_{om} \cdot c_s \left(\frac{(T_0 + T_m)}{2 \cdot 100} \right)^3$$

där ϵ_{om} nu betecknar resulterande emissionstal mellan yta 0 och övriga ytor.

Värmeövergången vid en yta påverkas även av eventuell kondensation på eller avdunstning från ytan, eller t ex regn på ytan. Man definierar ibland ett värmeövergångstal p g a kondensation, α_{kond} . Eftersom strålnings- och strömningsförhållandena vid ytan förändras av kondensationen innebär det en förenkling att direkt summera de olika övergångstalen. Med viss försiktighet kan man emellertid vid överslagsberäkningar sätta

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k + \alpha_{kond}$$

Från inverkan av kondensation och avdunstning bortses i fortsättningen.

I den svenska byggnormen, SBN 1975, anges summan av yttre och inre värmeövergångsmotstånd för vägg och tak mot det fria vara lika med $0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$. Av detta brukar man anse ca 0,20 höra till ytterväggens insida och 0,05 till utsidan. Vid beräkning av yttemperaturer på olika ytor anger man emellertid värden på inre övergångsmotståndet, m_i , enligt tabellen nedan.

TABELL 2.2. Godtaga beräkningsvärden för inre värmeövergångsmotståndet vid beräkning av yttemperatur enligt SBN 1975.

Byggnadsdel	m_i ($\text{m}^2\text{K/W}$)	Anmärkning
Fönster	0,12	
Yttervägg med fönster	0,12	Övriga rumsytor mot uppvärmt utrymme
	0,20	Fler än en rumsyta mot ouppvärt utrymme eller det fria
Yttervägg utan fönster	0,25	
Golv	0,25	En yttervägg med fönster
	0,35	Fler än en rumsyta mot ouppvärt utrymme eller det fria
Tak	0,20	En yttervägg med fönster
	0,30	Fler än en rumsyta mot ouppvärt utrymme eller det fria

För värmeövergången mitt på en yttervägg angavs tidigare i SBN 67

$m_i + m_u = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$, varav man brukade sätta $m_i = 0,13$ och $m_u = 0,04$. Detta ger $\alpha_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ och $\alpha_u = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$, vilka värden har använts för de i KAP 2.4 redovisade beräkningarna.

Att sätta α konstant över alla ytor leder givetvis till vissa fel i beräkningarna, främst vad det gäller bedömning av risken för ytkondensation t ex i fönstersmygar. Ett annat fel är att effektbehovet för en byggnad kan underskattas (eller överskattas), eftersom värmeövergången kan variera inom ett stort område även om man kan välja värden som är genomsnittligt korrekta.

Värmeövergången vid ytterytor finns noggrant behandlad i litteraturen, se t ex Brown (1956) och Sandberg (1973). Van Straaten (1967) anger rekommenderade värden på yttre värmeövergångskoefficienter, α_u , för olika länder. Dessa varierar mellan ca 14 och 34 $\text{W/m}^2\text{K}$.

Den för beräkningarna valda yttre värmeövergångskoefficienten ligger troligen något i överkant, varför beräkning även gjorts med $\alpha_u = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

2.3 DISKUSSION AV VÄRMEÖVERGANG VID RUMSYTOR

Strålningsovergångskoefficienten vid en yta kan beräknas enligt KAP 2.2 om man förutsätter stationära temperaturförhållanden och kända temperaturer och emissionstal hos omgivande ytor. Nevander (1961) redovisar en sådan beräkning för ett rum enligt FIG 2.5. För fallet med endast motstrålande väggar och bjälklag med samma temperatur ökar α_s till det dubbla från ytterväggshörnet till mitt på väggen, eftersom synfaktorn i hörnet är $\frac{1}{2}$ mot 1 mitt på väggen.

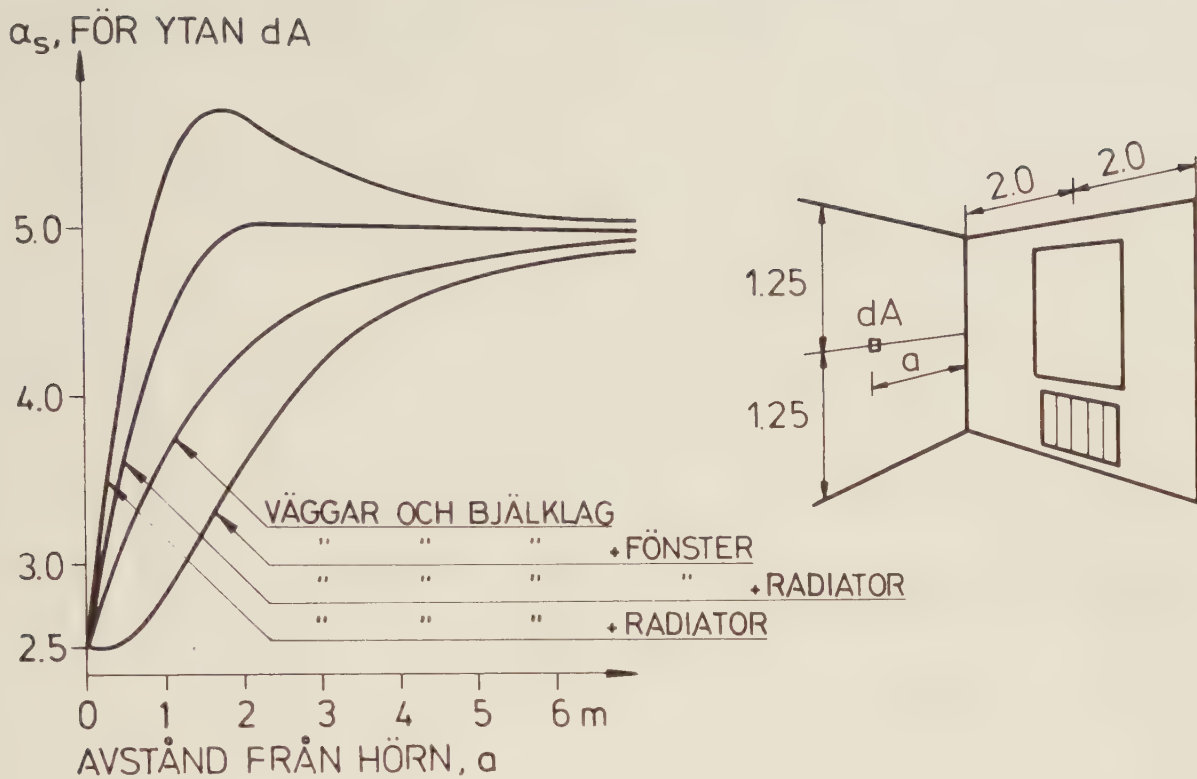


FIG 2.5. Exempel på variation i värmeövergångskoefficient p g a strålning, α_s , på olika avstånd från ytterväggshörn. (Nevander 1961).

För konvektion vid ytor används experimentellt funna samband, vanligen uttryckta med hjälp av något eller några av de dimensionslösa talen

Nusselts tal
$$Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda}$$

Reynolds tal
$$Re = \frac{u l}{\nu}$$

Grashofs tal
$$Gr = \frac{g \cdot \beta}{\nu^2} \cdot \Delta \vartheta$$

Prandtls tal
$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

l = längd eller annan karakteristisk dimension (m)

λ = värmeledningstal (W/mK)

u = strömningshastighet (m/s)

ν = kinematisk viskositet (m^2/s)

g = tyngdaccelerationen $9,81 m/s^2$

β = volymutvidgningskoefficienten	(K^{-1})
$\Delta\vartheta$ = temperaturskillnaden mellan yta och medium på avstånd från ytan	$(K \text{ eller } ^\circ C)$
a = termisk diffusivitet	(m^2/s)

Egenkonvektion vid fria vertikala och horisontella skivor kan representeras i formen

$$Nu_{medel} = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad \text{där}$$

$$Nu_{medel} = \text{genomsnittligt Nusselttal för hela skivan} = \frac{\alpha_{medel} \cdot l}{\lambda}$$

Då strömningen är laminär ($Pr \cdot Gr < 10^8$) gäller

$$Nu_{medel} = C_1 (Gr \cdot Pr)^{0,25}$$

C_1 brukar i litteraturen anges vara ca 0,5 - 0,6.

Den lokala konvektionsövergångskoefficienten på avståndet x från skivans början kan beräknas ur

$$Nu_x = \frac{\alpha_x \cdot x}{\lambda} = \frac{3}{4} \cdot Nu_{medel}$$

Då strömningen blir turbulent gäller

$$Nu = C_2 (Gr \cdot Pr)^{0,33}$$

C_2 brukar anges vara 0,10 - 0,15.

I detta fall är Nusselttalet oberoende av x .

I FIG 2.6 visas α_k för en vertikal vägg enligt ovanstående uttryck som funktion av avståndet från väggens ovkant och temperaturskillanden mellan luft och yta. Då $Gr \cdot Pr$ blir större än 10^8 antas strömningen bli turbulent, varför α_k blir ungefär oberoende av höjden.

Eftersom insidan av en ytterväggsyta normalt är kallare än rumsluften är strömningen nedåtriktad och konvektionsövergångskoefficienten störst nära taket. Enligt denna beräkning är variationen i α_k med höjden ganska liten.

Det beräknade värdet är ca 2 - 2,5 W/m²K vid en temperaturdifferens som är 3 °C. Omslag till turbulent strömning sker i detta fall vid avståndet ca 0,7 m från strömningens teoretiska början.

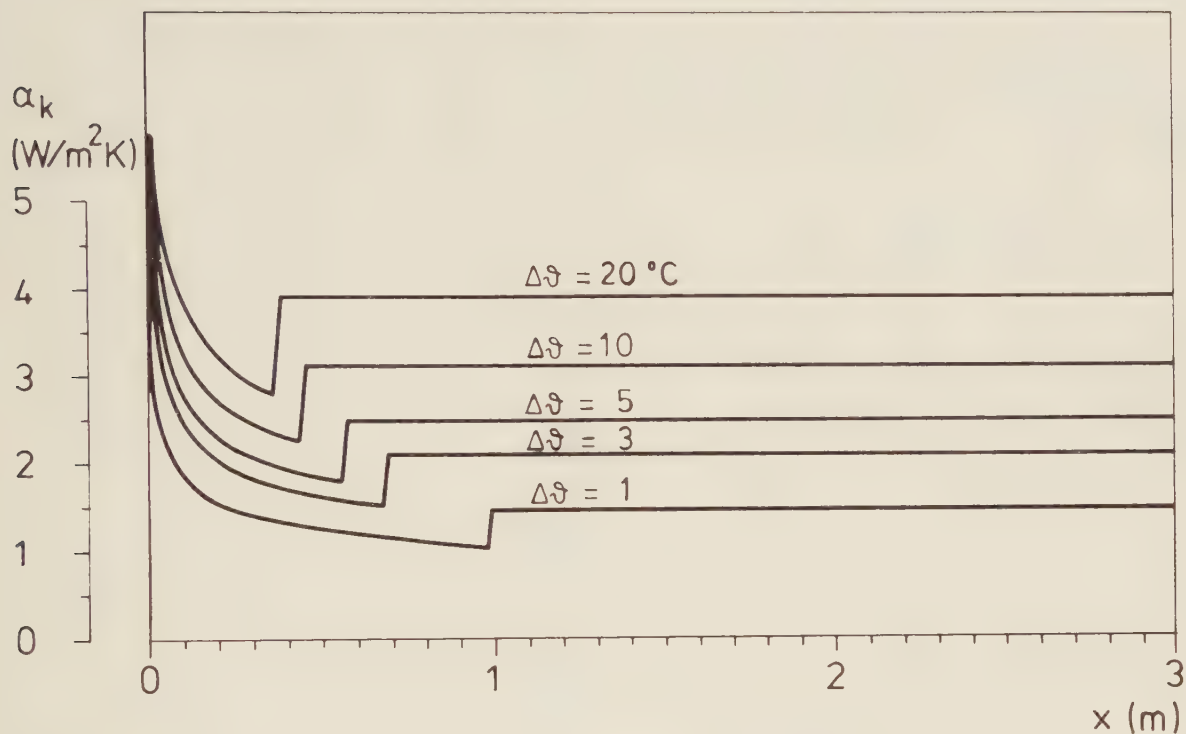


FIG 2.6. Egenkonvektion vid vertikal yta som funktion av avstånd från ytans ovkant och temperaturdifferens mellan yta och luft.

För hela rumsytor anges av Kollmar och Liese (1957) följande uttryck:

varmt golv	$\alpha_k = 2,6 \cdot \Delta\vartheta^{0,25}$
varmt tak	$\alpha_k = 0,6 \cdot \Delta\vartheta^{0,25}$
varm vägg	$\alpha_k = 2,0 \cdot \Delta\vartheta^{0,25}$

$\Delta\vartheta$ är differensen mellan ytans temperatur och omgivande lufts temperatur. Med "varm" yta menas en yta vars temperatur är högre än lufttemperaturen. Man kan anta att uttrycket för varmt tak gäller för kallt golv, att uttrycket för varmt golv gäller för kallt tak och att uttrycket för varm vägg gäller även för kall vägg.

Dessa uttryck uppges gälla för oventilerade rum. För ventilerade rum bör α_k vara större. Exempelvis kan man anta

tak	$\alpha_k = 3,6 \cdot \Delta\vartheta^{0,25}$
golv	$\alpha_k = 1,6 \cdot \Delta\vartheta^{0,25}$
vägg	$\alpha_k = 3,0 \cdot \Delta\vartheta^{0,25}$

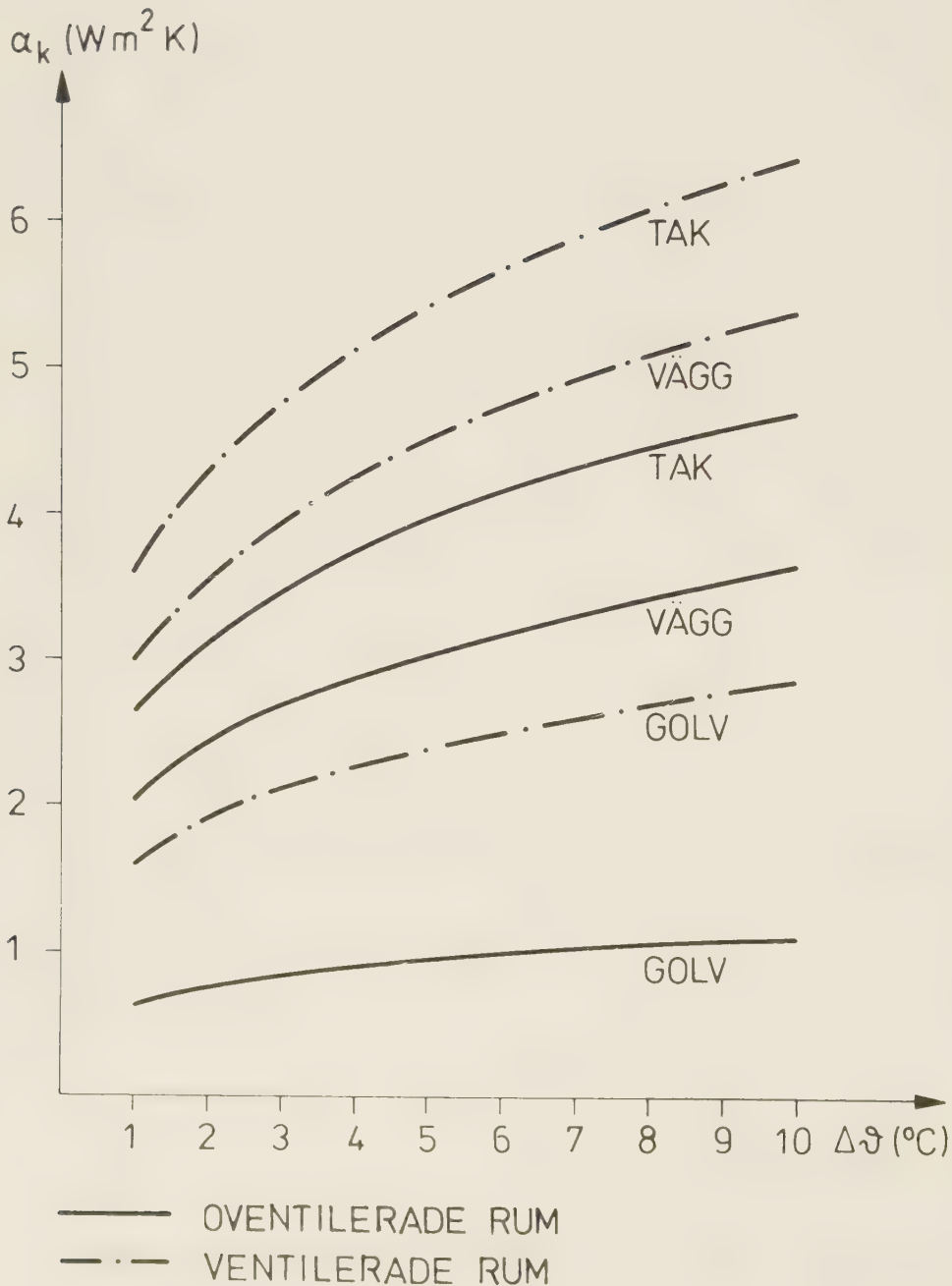


FIG 2.7. Konvektionsövergångstal enligt Kollmar & Liese (1957) som funktion av temperaturdifferensen mellan ytan och omgivande luft.

Mätningar av värmeövergångskoefficienter i ett rum har gjorts av Adamson (1970). Dessa mätningar företogs i ett hörnrum i en enplansvilla. α i en punkt på en yta definieras som

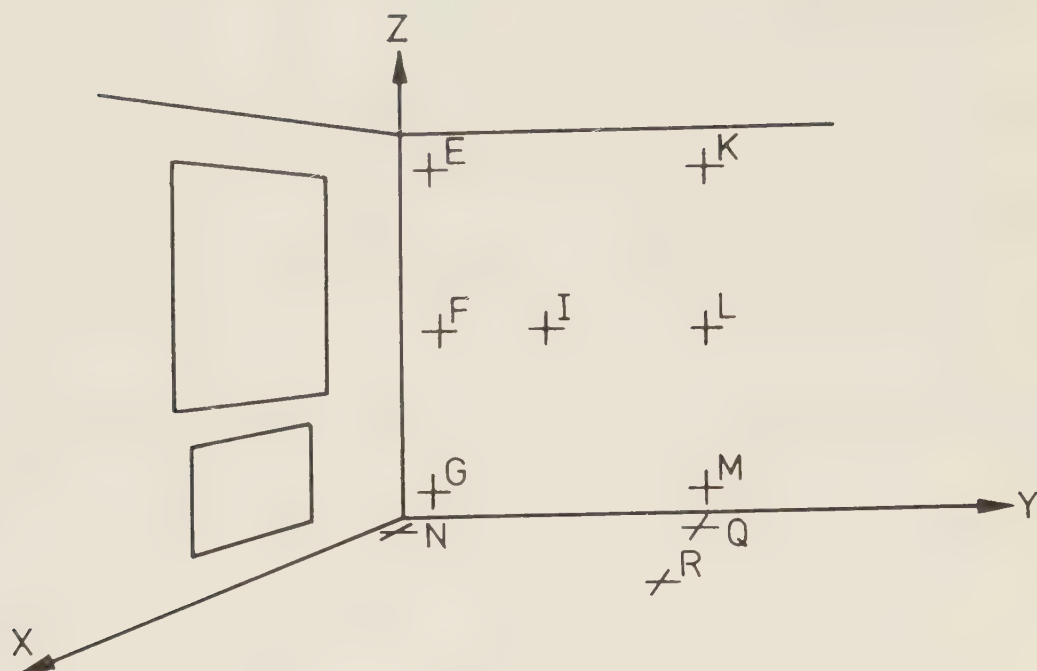
$$\alpha = \frac{q}{\vartheta_r - \vartheta_y} \quad \text{där}$$

q = värmeflödet i punkten (W/m^2)

ϑ_r = genomsnittlig rumstemperatur i rummets mitt (K eller $^{\circ}\text{C}$)

ϑ_y = temperaturen i punkten.

FIG 2.8 visar mätpunkternas placering och mätresultaten för det aktuella fallet.



Mät- punkt	x (m)	y (m)	z (m)	ϑ_y (°C)	α_s (W/m ² K)	α_k (W/m ² K)
E	0	0,20	2,25	18,1	1,0	3,4
F	0	0,20	1,20	17,9	0,9	2,6
G	0	0,20	0,15	17,1	1,7	1,2
I	0	0,95	1,20	18,1	1,2	2,4
K	0	2,00	2,25	18,5	0,7	4,8
L	0	2,00	1,20	18,1	1,5	2,5
M	0	2,00	0,15	17,3	2,1	1,6
N	0,20	0,20	0	16,9	2,0	0,5
Q	0,20	2,00	0	17,0	2,8	-0,9
R	2,00	2,00	0	17,4	3,7	-2,2

FIG 2.8. Mätning av α -värden. Placering av mätpunkter samt medelvärden över en 60-timmars period i januari (Adamson 1970).

Bestämningen av övergångskoefficienterna i ett rum bör göras med ett passningsförfarande eftersom både α_s och α_k är funktioner av ytemperaturen.

För beräkning av inverkan av α_i på värmefflöde och yttemperatur vid köldbryggor används en modell enligt FIG 2.9 nedan. Det är en del av en yttervägg med bjälklagsanslutning, där innerytorna delas in i zoner med olika värmeövergångskoefficienter.

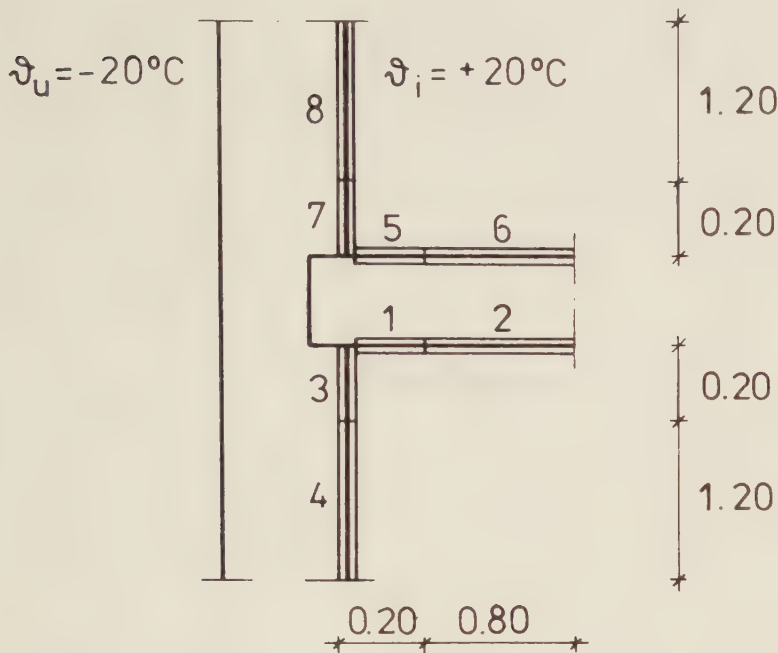


FIG 2.9. Indelning av yttervägg med bjälklagsanslutning i zoner med olika övergångstal.

Två fall beräknas, vilka antas motsvara ett svagt respektive ett kraftigare ventilerat rum. TAB 2.3 nedan anger övergångskoefficienterna för de två fallen, och beräkningsresultaten redovisas i KAP 2.4.

Övergångskoefficienterna uppskattas med hjälp av beräknade yttemperaturer vid $\alpha_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. För strålningsförhållandena är modellen ovan otillräcklig, eftersom inverkan av synfaktorns variation sträcker sig betydligt längre än 20 cm. För konvektionsförhållandena är den förmodligen bättre, eftersom, under ideala förhållanden, α_k :s variation är ganska liten ca 20 cm från strömningens början (FIG 2.6). Vid bedömning av risk för ytkondensation är det emellertid tillräckligt att betrakta en anslutning

inom ett ganska litet område eftersom de lägsta temperaturerna alltid inträffar i själva hörnet.

TABELL 2.3. Övergångskoefficienter för modellen i FIG 2.9.

Zon	Fall 1 svagt ventilerat rum			Fall 2 kraftigare ventilerat rum		
	α_s	α_k	$\alpha_s + \alpha_k$	α_s	α_k	$\alpha_s + \alpha_k$
1	2,25	4,0	6,25	2,25	5,5	7,75
2	5,0	3,0	8,0	5,0	4,25	9,25
3	2,25	3,0	5,25	2,25	4,5	6,75
4	4,5	2,5	7,0	4,5	4,0	8,5
5	2,25	1,0	3,25	2,25	2,3	4,55
6	5,0	0,8	5,8	5,0	1,8	6,8
7	2,25	1,5	3,75	2,25	2,0	4,25
8	4,5	2,5	7,0	4,5	4,5	9,0

Fönster

Värmeövergången vid fönster och fönstersmygar är komplicerad. I denna diskussion skall hänsyn inte tas till sol- och himmelsstrålningens inverkan på fönstrets temperatur- och övergångsförhållanden. Vintertid tillförs ett fönster då värme från luft som strömmar upp från radiatorer under fönstret, rumsluft som strömmar ner vid fönstret och strålning från omgivande ytor, golv, tak och väggar.

Strålningsövergångskoefficienten vid fönstret kan approximativt beräknas ur tidigare angivna formler.

För den konvektiva övergången vid fönstret kan sättas

$$\alpha_k = 2,2 (\vartheta_1 - \vartheta_y)^{0,25} \quad \text{vid egenkonvektion}$$

$$\alpha_k = 5,8 + 3,9 \cdot u \quad \text{vid påtvingad konvektion}$$

u är medelhastigheten i luftströmmen. Uttrycket gäller ungefär om $u < 5$ m/s.

En radiator som är placerad under fönstret påverkar konvektionsförhållandena kraftigt. Om varm luft från radiatoren strömmar förbi fönstret höjs fönstrets och fönstersmygens temperatur och risken för ytkondensation minskar. En annan konsekvens är att det är osäkert vilken temperatur α_k skall relateras till.

Om man betraktar förhållandena utan hänsyn till luftströmning från radiatorer kan man anta att konvektionsövergångskoefficienten på smygens horisontella ytor är liten. Vid sidoytorna kan luftströmningen ske mera obehindrat och α_k vara stort. Både α_s och α_k bör vara relativt stora vid själva fönsterytan. Strålningsövergången vid smygens ytor påverkas av fönstrets och övriga motstrålande ytors temperatur. Härvid är bl a smygdjupet av betydelse.

En beräkning med varierande värmeövergångskoefficienter på smyg- och fönsteryta redovisas i KAP 3. De övergångskoefficienter som använts på de olika ytorna visas i FIG 2.10. α_k har här satts lika med 0 på smygens insida, och övriga övergångskoefficienter har beräknats ur de temperaturförhållanden som erhållits vid beräkning med $\alpha_i = 7,7$.

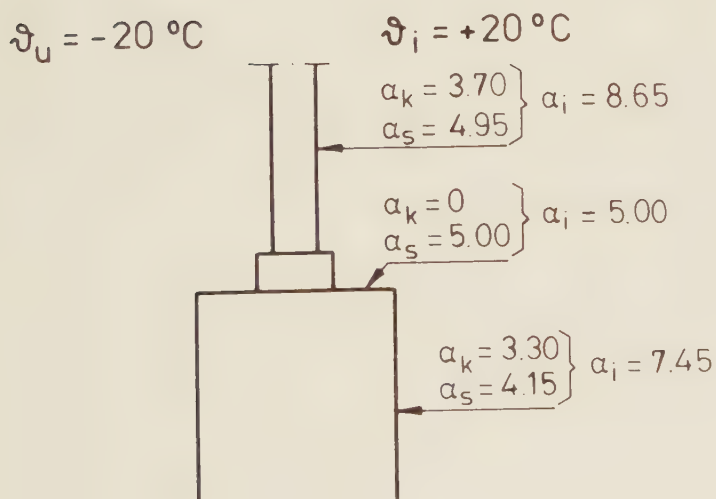


FIG 2.10. Antaganden om värmeövergångskoefficienter i fönstersmyg.

Avsikten med ovanstående modell är främst att visa inverkan av α på köldbryggeeffekterna. Som approximation av verkligheten är den mycket grov.

2.4 VÄRMEFÖRLUSTER GENOM KÖLDBRYGGOR - BERÄKNINGSRESULTAT

I detta avsnitt redovisas de beräknade värmeförlusterna genom några av de i FIG 2.1 - 2.4 visade köldbryggorna. Effekten av varje köldbrygga har beräknats med och utan invändig tilläggsisolering. I de flesta fall har beräkningarna gjorts med isoleringstjocklekarna 5, 7, 10, 12 och 15 cm. Invändig beklädnad har i samtliga fall antagits vara en 13 mm gipsskiva ($m = 0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$).

Det extra värmeflödet genom en köldbrygga kan definieras på olika sätt. Ett sätt är att minska det datorberäknade värmeflödet genom ytterväggen inklusive köldbrygga med det värmeflöde som erhålls genom en lika lång bit av ytterväggen utan köldbrygga. Ett annat sätt som ibland kan vara att föredra vid praktiska beräkningar av värmeförlusterna är att fördela det extra värmeflödet på ytterväggens innermått. Principerna för de båda sätten visas i FIG 2.11. Sambandet mellan de båda sätten att ange det extra värmeflödet genom köldbryggan blir

$$q_e^{II} = q_e^I + k \cdot d \cdot (\vartheta_i - \vartheta_u) \quad \text{där}$$

q_e^{II} = extra värmeflöde genom köldbryggan fördelat på innermått

q_e^I = extra värmeflöde genom köldbryggan jämfört med en lika lång yttervägg utan köldbrygga

k = k-värdet för ytterväggen utan köldbrygga

d = köldbryggans bredd

ϑ_i, ϑ_u = temperaturen på in-respektive utsidan av ytterväggen

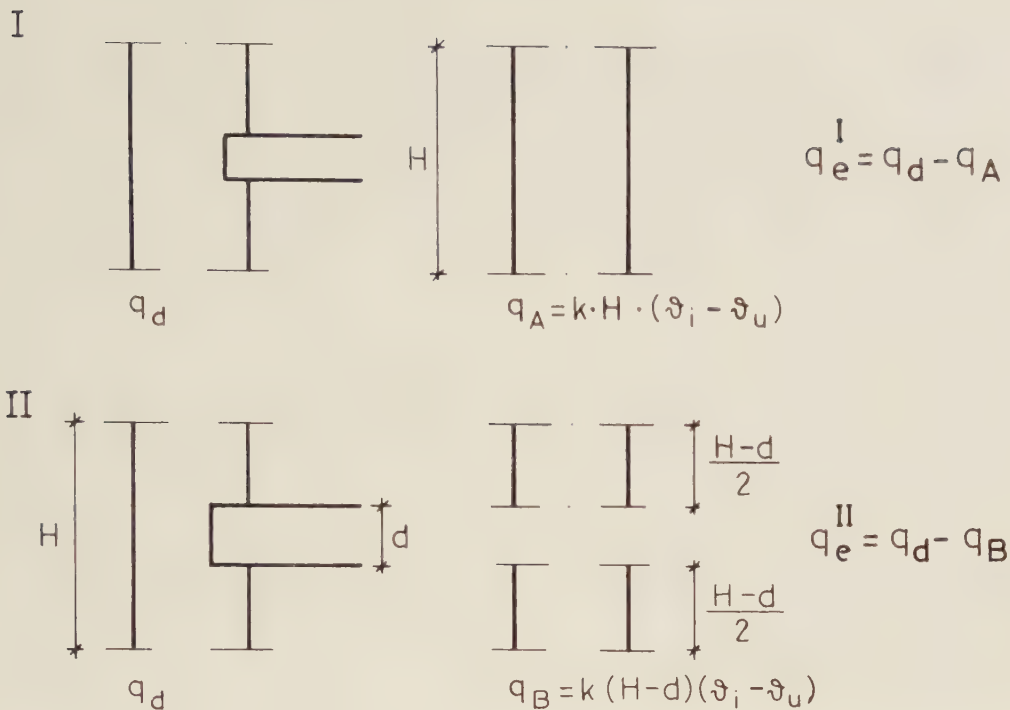


FIG 2.11. Olika principer för beräkning av extra värmeflöde genom köldbryggor.

I TAB 2.4 redovisas det extra värmeflödet per längdmeter köldbrygga och vid 1 grads temperaturskillnad.

För bjälklags-, innerväggs- och balkongplatteanslutningar är det extra värmeflödet beräknat enligt båda ovannämnda definitionerna.

I fallet fönstersmygar finns det ingen anledning att skilja på fall med inner- och yttermått. I rapporten "Köldbryggor i tilläggsisolerade ytterväggar", Andersson (1978) jämfördes det datorberäknade värmeflödet med en beräkning där alla skikt i själva smygen, ytbehandlingar, isoleringar mm togs med i beräkningen. Detta kan ge resultat som är förbryllande vid första anblicken och har därför övergivits. I fortsättningen jämförs det datorberäknade värmeflödet med det endimensionella flödet genom ytterväggen och fönstret, där själva smygens utseende inte tas hänsyn till. Skillnaden blir inte märkbar för de köldbryggor som redovisas i detta kapitel. I KAP 3, där inverkan av fönstersmygisolering behandlas, av-

viker resultatet emellertid från tidigare redovisning.

För ytterväggshörn används innermått vid beräkningen av det extra värme-flödet. Man kan också jämföra det datorberäknade värme-flödet med det en-dimensionella flödet genom en bit som är lika lång som yttermåtten. I så fall blir det extra värme-flödet negativt, då hörnet kommer att verka som en extra isolering. Vid invändig isolering blir innermåtten mindre än i det oisolerade fallet.

I TAB 2.4 redovisas också de beräknade hörntemperaturerna vid innetempe-raturen $+20^{\circ}\text{C}$ och utetemperaturen -20°C . Det bör observeras att detta inte är de verkliga yttemperaturerna, eftersom beräkningarna är schablon-mässigt gjorda med samma övergångstal på alla invändiga ytor. Temperatu-rerna är medtagna endast för att visa vilken inverkan den invändiga iso-leringen har på temperaturen i hörn och fönstersmygar. De får dock inte ses som några absolutvärden.

TABELL 2.4. Extra värme-flöde genom köldbryggor i yttervägg med och utan invändig tilläggsisolering.

Köldbrygga	Invändig isolering (cm)	k (W/m ² K)	q_e^I (W/mK)	q_e^{II} (W/mK)	$\vartheta_{\min}$ ($^{\circ}\text{C}$)
A.1.1.1	0	1,20	0,06	0,31	13,3
1½-stens tegelmur	5	0,51	0,29	0,40	11,6
bjälklagsanslut-	7	0,42	0,32	0,41	11,7
ning av betong	10	0,33	0,34	0,41	11,9
	12	0,29	0,35	0,41	12,1
	15	0,25	0,36	0,41	12,4
A.1.2.1	0	1,20	-0,11	0,29	11,1
1½-stens tegelmur	5	0,51	0,03	0,21	15,5
bjälklagsanslut-	7	0,42	0,05	0,20	15,6
ning av trä	10	0,33	0,07	0,18	15,6
	15	0,25	0,08	0,16	16,3
A.2.1.1	0	1,20	0,00	0,32	12,8
1½-stens tegelvägg	5	0,51	0,18	0,32	11,6
innervägg av 1-stens-	10	0,33	0,22	0,31	12,4
tegel	15	0,25	0,24	0,31	13,0

TABELL 2.4. Extra värmefflöde genom köldbryggor i yttervägg med och utan invändig tilläggsisolering.

Köldbrygga	Invändig isolering (cm)	k (W/m ² K)	q _e ^I (W/mK)	q _e ^{II} (W/mK)	θ _{min} (°C)
A.2.2.1					
1½-stens tegelvägg	0	1,20	0,00	0,08	14,1
icke bärande	5	0,51	0,09	0,13	13,8
innervägg av tegel-	7	0,42	0,10	0,13	14,2
plattor	10	0,33	0,10	0,12	14,9
	12	0,29	0,10	0,12	15,1
	15	0,25	0,10	0,11	15,6
A.4.1					
1½-stens tegelvägg	0	1,20	0,22	0,47	11,6
16 cm genomgående	5	0,51	0,34	0,45	11,8
betongplatta, bjälk-	7	0,42	0,36	0,45	11,9
laget isol. under-	10	0,33	0,37	0,44	12,3
till med träullsplatta	12	0,29	0,37	0,43	12,5
	15	0,25	0,37	0,43	12,7
A.3.1					
Fönstersmyg i	0	1,20	0,12	-	8,8
1½-stens tegelvägg	5	0,51	0,25	-	5,4
	7	0,42	0,27	-	5,2
	10	0,33	0,29	-	4,9
	12	0,29	0,31	-	4,8
	15	0,25	0,31	-	4,7
A.5.1					
Ytterväggshörn i	0	1,20	-	0,18	8,5
1½-stens tegelvägg	5	0,51	-	0,06	14,2
	7	0,42	-	0,04	15,0
	10	0,33	-	0,04	15,8
	12	0,29	-	0,03	16,2
	15	0,25	-	0,03	16,7
B.1.1.1					
1-stens tegelvägg +	0	0,81	0,32	0,49	11,3
5 cm träullsplatta	5	0,42	0,40	0,49	11,4
betongbjälklag	7	0,35	0,41	0,49	11,7
	10	0,29	0,42	0,48	12,0
	12	0,26	0,41	0,47	12,2
	15	0,22	0,41	0,45	12,6

TABELL 2.4. Extra värmefflöde genom köldbryggor i yttervägg med och utan invändig tilläggsisolering.

Köldbrygga	Invändig isolering (cm)	k (W/m ² K)	q _e ^I (W/mK)	q _e ^{II} (W/mK)	θ _{min} (°C)
B.2.1.1	0	0,81	0,15	0,37	12,8
1-stens tegelvägg med	5	0,42	0,24	0,35	12,3
putsad träullsplatta	7	0,36	0,25	0,35	12,6
innervägg av 1-stens-	10	0,29	0,25	0,33	13,0
tegel	12	0,26	0,25	0,32	13,3
	15	0,22	0,25	0,31	13,7
B.4.1	0	0,81	0,33	0,50	12,0
1-stens tegelvägg med	5	0,42	0,38	0,47	12,5
5 cm träullsplatta.	7	0,36	0,39	0,47	12,8
Plattan som A.4.1.	10	0,29	0,39	0,45	13,1
	12	0,26	0,39	0,44	13,4
	15	0,22	0,37	0,42	13,7
B.3.1	0	0,81	0,14	-	6,7
Fönstersmyg i 1-stens	5	0,42	0,21	-	1,9
tegelvägg + 5 cm trä-	7	0,36	0,21	-	1,6
ullsplatta	10	0,29	0,22	-	1,4
	15	0,22	0,24	-	1,2
B.5.1	0	0,81	-	0,07	13,0
Ytterväggshörn i	5	0,42	-	0,04	16,4
1-stens tegelvägg +	10	0,29	-	0,03	17,3
5 cm träullsplatta	15	0,22	-	0,03	17,8
C.1.1.1	0	0,75	0,05	0,28	13,8
25 cm gasbetongmur-	5	0,41	0,14	0,26	12,9
verk med betongbjälk-	7	0,35	0,15	0,25	12,9
lag	10	0,28	0,15	0,23	12,9
	12	0,25	0,15	0,22	12,9
	15	0,22	0,14	0,20	12,8
C.2.1.1	0	0,75	0,05	0,28	13,8
25 cm gasbetongmur-	5	0,41	0,14	0,26	12,9
verk innervägg av	7	0,35	0,15	0,25	12,9
betongblock	10	0,28	0,15	0,23	12,9
	12	0,25	0,15	0,22	12,9
	15	0,22	0,14	0,20	12,8

TABELL 2.4. Extra värmefflöde genom köldbryggor i yttervägg med och utan invändig tilläggsisolering.

Köldbrygga	Invändig isolering (cm)	k (W/m ² K)	q _e ^I (W/mK)	q _e ^{II} (W/mK)	θ _{min} (°C)
C.4.1	0	0,75	0,30	0,50	11,2
25 cm gasbetong-	5	0,41	0,33	0,44	13,5
murverk genomgående	7	0,35	0,34	0,43	13,8
16 cm betongplatta,	10	0,28	0,34	0,41	14,3
övergolv av trä	12	0,25	0,34	0,40	14,5
	15	0,22	0,33	0,39	14,8
C.3.1	0	0,75	0,03	-	13,8
Fönstersmyg i 25 cm	5	0,41	0,07	-	11,8
gasbetongmurverk	7	0,35	0,09	-	11,6
	10	0,28	0,10	-	11,3
	15	0,22	0,11	-	11,1
C.5.1	0	0,75	-	0,16	12,4
Ytterväggshörn i 25 cm	5	0,41	-	0,06	15,0
gasbetongmurverk	10	0,28	-	0,04	16,2
	15	0,22	-	0,04	16,9
D.1.1.1	0	1,01	0,02	0,21	15,5
Utvändigt gasbetong-	5	0,47	0,26	0,35	12,6
isolerad betongvägg	7	0,39	0,30	0,37	12,6
med betongbjälklag	10	0,31	0,34	0,40	12,6
	12	0,28	0,35	0,40	12,7
	15	0,24	0,36	0,41	12,9
D.2.1.1	0	1,01	0,01	0,16	15,7
Utvändigt gasbetong-	5	0,47	0,24	0,31	12,7
isolerad betongvägg	7	0,39	0,27	0,33	12,6
med innervägg av	10	0,31	0,30	0,35	12,7
betong	12	0,28	0,31	0,36	12,8
	15	0,24	0,32	0,36	13,0
D.4.1	0	1,01	0,54	0,73	11,6
Utvändigt gasbetong-	5	0,47	0,54	0,63	9,7
isolerad betongvägg,	7	0,39	0,54	0,62	9,9
genomgående 16 cm	10	0,31	0,54	0,60	10,3
betongplatta	12	0,28	0,54	0,59	10,6
	15	0,24	0,53	0,57	11,1

TABELL 2.4. Extra värmefflöde genom köldbryggor i yttervägg med och utan invändig tilläggsisolering.

Köldbrygga	Invändig isolering (cm)	k (W/m ² K)	q_e^I (W/mK)	q_e^{II} (W/mK)	ϑ_{min} (°C)
D.3.1	0	1,01	0,10	-	13,4
Fönstersmyg i be-	5	0,47	0,15	-	5,9
tongvägg utvändigt	7	0,39	0,17	-	5,1
isolerad med gas-	10	0,31	0,19	-	4,4
betong	15	0,24	0,22	-	3,6
D.5.1	0	1,01	-	0,24	11,2
Ytterväggshörn i	5	0,47	-	0,07	16,2
15 cm betongvägg	7	0,39	-	0,06	16,7
med 10 cm utvändigt	10	0,32	-	0,05	17,2
gasbetong	15	0,24	-	0,04	17,7
E.1.1.1	0	0,98	-0,08	0,19	12,9
Plankvägg med	5	0,47	0,02	0,16	14,8
träbjälklag	7	0,39	0,04	0,15	15,2
	10	0,31	0,05	0,13	15,7
	12	0,28	0,05	0,13	16,0
	15	0,23	0,05	0,12	16,4

Det extra värmefflödet genom köldbryggorna, q_e^I , ökar i början snabbt med ökande invändig isolertjocklek, för att sedan plana ut och i vissa fall minska vid stora isolertjocklekar.

Ökningen av extra värmefflöde med isolertjockleken beror delvis på den valda definitionen. Ju mera isolering av omgivande vägg, desto mindre är värmefflödet genom den del av väggen som köldbryggan ersätter, och det extra värmefflödet blir därför större. För de anslutningar där bjälklaget i sig inte utgör någon köldbrygga före tilläggsisoleringen blir det extra värmefflödet, q_e^I , negativt. Detta beror också på definitionen. Värmefflödet ut genom anslutningen är ju mindre än om anslutningen inte hade funnits, eftersom denna verkar som en extra isolering.

Genomgående balkongplattor av betong är kraftiga köldbryggor. Man försöker därför ofta bryta dem med någon typ av kantisolering. Detta medför emellertid att armeringen i plattan måste ökas, vilket motverkar kant-

isoleringens effekt. I dessa beräkningar har inte tagits hänsyn till detta.

För att se inverkan av utvändig isolering har ett par köldbryggor i 1½-stens tegelväggen beräknats med 5 och 10 cm utvändig isolering där resulterande λ -värdet för isoleringsmaterialet satts till 0,047 W/mK och utvändig beklädnad antagits ha samma värmemotstånd som den invändiga beklädnaden i de andra fallen. Detta visas i TAB 2.5.

TABELL 2.5. Extra värmefflöde genom köldbryggor i 1½-stens tegelvägg vid utvändig tilläggsisolering.

Köldbrygga	Utvändig isolering (cm)	k (W/m ² K)	q _e ^I (W/mK)	q _e ^{II} (W/mK)	θ _{min} (°C)
A.1.1.1	5	0,51	0,02	0,13	17,1
Bjälklagsanslutning	10	0,33	0,01	0,07	18,1
A.4.1	5	0,51	0,40	0,50	14,2
Balkongplatteanslutning	10	0,33	0,44	0,51	15,1
A.3.1	5	0,51	0,19	-	10,9
Fönstersmyg	10	0,33	0,27	-	11,0
A.5.1	5	0,51	-	0,22	13,6
Ytterväggshörn	10	0,33	-	0,18	15,5

För bjälklagsanslutningen blir extra värmefflödet, som väntat, försumbart då väggen isoleras utvändigt.

För balkongplatteanslutningen och fönstersmygen blir extra värmefflödet av samma storleksordning som vid invändig tilläggsisolering. I fallet balkongplattor är det t o m större än för det oisolerade och det invändigt isolerade fallet. Man kan se på balkongplattans inverkan på två olika sätt. Dels kan man betrakta den som en bit material som sitter utanpå köldbryggan och ger en liten tilläggsisolering, dels kan man se den som en fena av ett värmeledande material genom vilken värme leds ut från väggen. För att kontrollera vilken av effekterna som överväger har gjorts tvådimensionella temperaturberäkningar för en anslutning mellan en 25 cm tjock gasbetongvägg och en 16 cm tjock balkongplatta av betong vars utkragning varierades mellan 0 och 1,5 m. Värmefflödet ut

genom väggen beräknades. I fallet då balkongplattan var avskuren jäms med fasaden var totala värmeflödet obetydligt högre än i de andra fallen. För utkragning mellan 0,5 och 1,5 m var skillnaden i värmeflödet praktiskt taget lika med noll. Det verkar alltså som om balkongplattans minskade utkragning inte kan förklara att extra värmeflödet ökar då väggen isoleras utvändigt. Fallen med invändig och utvändig isolering är i stort sett symmetriska, eftersom balkongplattans längd inte har någon större inverkan på värmeförlusterna. De som i övrigt skiljer de två fallen åt är värmeövergångskoefficienterna på in- respektive utsidan. Det är tänkbart att en beräkning med samma värmeövergångskoefficient på in- och utsidan inte skulle ge någon skillnad mellan fallen med in- respektive utvändig isolering.

Den utvändiga tilläggsisoleringen ger en kraftig temperaturhöjning på ytterväggens utsida vid anslutningen mellan vägg och platta. Detta visas i FIG 2.12 där yttemperaturen längs ytterväggens utsida och balkongplattans ovansida projicerats på en rät linje för anslutning A.4.1 med och utan 5 cm utvändig tilläggsisolering.

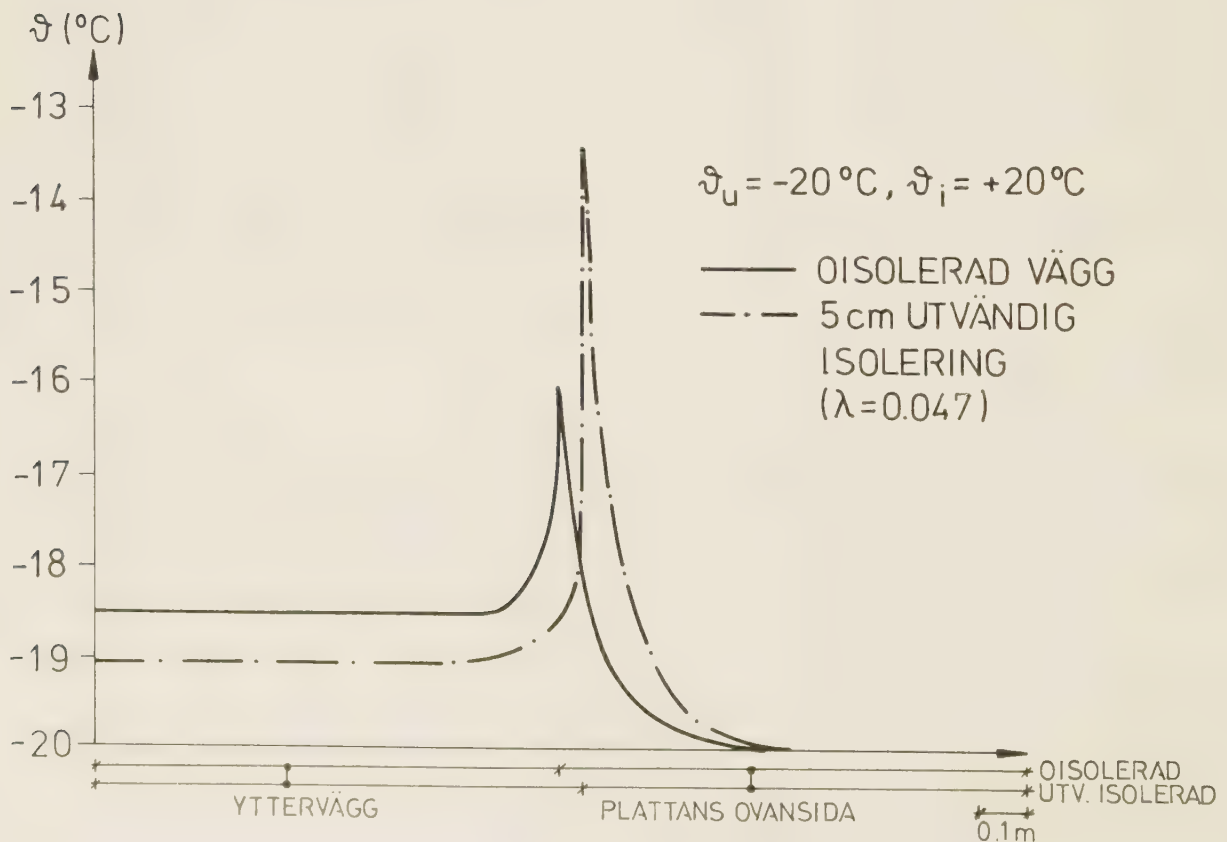


FIG 2.12. Utvändig yttemperatur på vägg och ovansida av balkongplatta. Anslutning A.4.1 ($1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg) med och utan utvändig isolering av väggen.

För ytterväggshörn minskar det extra värmeflödet vid invändig och ökar vid utvändig isolering. Isolering av ett ytterväggshörn måste, såvida man inte använder isoleringselement kompletta med beklädnad, konstruktivt lösas på ett sätt som medför extra regler i själva hörnet p g a spikmöjligheter för beklädnadsskivor. Detta kommer att medföra sänkt temperatur jämfört med den ovan beräknade. Temperaturen i hörnet blir dock med all säkerhet högre än före tilläggsisoleringen.

Värmeflöden och temperaturer vid köldbryggor vid olika värmeövergångskoefficienter har beräknats enligt förutsättningarna i KAP 2.3. Beräkningsresultaten jämförs i TAB 2.6 med referensfallet $\alpha_u = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Det totala värmeflödet genom väggen med köldbrygga används här som jämförelsestorhet, eftersom det knappast är meningsfullt att definiera något extra värmeflöde för fallen med olika värmeövergångskoefficienter på olika ytor.

TABELL 2.6. Värmeflöde och lägsta invändiga ytemperatur vid yttervägg med bjälklagsanslutning A.1.1.1, $\vartheta_i = +20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_u = -20 \text{ }^\circ\text{C}$. Räknat på 2,70 m.

Invändig isolering	$\alpha_u=25, \alpha_i=7,7$		$\alpha_u=15, \alpha_i=7,7$		$\alpha_u=25, \alpha_i \text{ fall 1}$		$\alpha_u=25 \alpha_i \text{ fall 2}$	
	q_{tot} W/mK	ϑ_{min} $^\circ\text{C}$	q_{tot} W/mK	ϑ_{min} $^\circ\text{C}$	q_{tot} W/mK	ϑ_{min} $^\circ\text{C}$	q_{tot} W/mK	ϑ_{min} $^\circ\text{C}$
0 cm	3,55	13,3	3,53	13,8	3,53	11,6	3,66	12,0
5 cm	1,80	11,6	1,79	12,0	1,79	10,6	1,82	11,4
10 cm	1,33	11,9	1,32	12,2	1,31	10,8	1,33	11,6
15 cm	1,08	12,4	1,08	12,7	1,07	11,3	1,09	11,8

2.5 UPPSKATTNING AV VÄRMEFÖRLUSTER GENOM KÖLDBRYGGOR

Eftersom valet av de beräknade köldbryggorna med nödvändighet måste begränsas kommer här att anges hur man kan beräkna eller uppskatta andra konstruktioners inverkan. Det är osannolikt att man, för praktisk dimensionering av isolering och beräkning av värmeförluster, behöver göra beräkningarna så noggrant som i de tidigare kapitlen. Beräkning av ytemperaturer för bedömning av eventuell kondensrisk måste man emellertid göra med en numerisk metod på dator och bedömning av invändiga övergångstal bör då också göras mera noggrant än för de i TAB 2.4 och 2.5 beräknade fallen.

Den noggrannaste metoden att beräkna värmeförlusterna är givetvis med numerisk metod på dator. Det finns t ex vid olika högskolor ett antal färdigutvecklade program för differensmetoder eller finita elementmetoder.

Från början gjordes försök att hitta allmänna formler för att beräkna inverkan av en köldbrygga. Det gick emellertid inte att ställa upp ett uttryck som täckte olika konstruktioner och materialkombinationer, med acceptabel noggrannhet och som var enkelt att använda. Bättre resultat fås förmodligen genom att utgå från beräknade konstruktioner i denna rapport och övrig litteratur och uppskatta inverkan av avvikande utformning.

Olika faktorerers inverkan på extra värmeflödet är ofta tydliga. Nedan anges några "tumregler" till hjälp för uppskattning. Dessa syftar på den definitionen av extra värmeflödet, där väggen med köldbryggan jämförs med en lika lång vägg utan köldbrygga.

1. Invändig tilläggsisolering av ytterväggen inverkar så att det extra värmeflödet ökar kraftigt från 0 till ca 5 cm isolering. Efter ca 7 cm invändig tilläggsisolering är det extra värmeflödet praktiskt taget konstant.
2. Köldbryggans inverkan ökar om väggtjockleken minskar vid konstant λ -värde för homogen vägg.
3. Köldbryggans inverkan ökar med väggens värmeledande förmåga i sitt eget plan (tvärströmning). En sandwichkonstruktion med betong på båda sidor om en isolering ger större värmeförlust genom en genomgående köldbrygga än en homogen vägg med samma k -värde. Om köldbryggan är i direkt kontakt med det ledande materialet i väggen blir värmeförlusterna större än om köldbryggan kan isoleras från detta.
4. Ökande utkragning av balkongplattan har troligen mycket liten betydelse för storleken av det extra värmeflödet. Utvändig isolering av vägg med balkongplatta ökar det extra värmeflödet, även jämfört med lika tjock invändig isolering.
5. Kantisoleringar av bjälklag o dyl förekommer ganska sällan i de byggnader det här är fråga om. Kantisolering av betongbjälklag med 3 cm

träullsplatta ger sänkning av extra värmeflödet av storleksordningen $0,01 - 0,06 \text{ W/mK}$, beroende på hur välisolerad väggen i övrigt är. Horisontella isoleringar av bjälklag eller balkongplatta ger en viss inverkan, men man bör komma ihåg att dessa ofta innebär att betongplattans tjocklek minskas och armeringen ökas. I de flesta beräkningar har man inte tagit hänsyn till detta, och inverkan av en kantisolering är i verkligheten kanske inte så stor.

I tabellen nedan har beräkningsresultaten systematiserats så att för olika ytterväggs- och köldbryggetyper anges ett extra värmeflöde p g a köldbryggan som uppskattats med hjälp av egna samt en del andras beräkningar. Konstruktionerna är generaliserade, och inverkan av utvändig eller invändig tilläggsisolering beaktas på följande sätt. För varje typkonstruktion anges ett ungefärligt värde på extra värmeflödet utan tilläggsisolering, ett värde vid utvändig tilläggsisolering och ett värde vid 7 cm invändig tilläggsisolering. Över 7 cm invändig tilläggsisolering antas det extra värmeflödet vara konstant. Mellan 0 och 7 cm invändig tilläggsisolering kan linjär interpolation göras. På detta sätt tar man ganska väl hänsyn till den invändiga isolertjocklekens inverkan på värmeförlusterna genom köldbryggorna.

Anledningen till att utvändig tilläggsisolering är medtagen i tabellen är, att för vissa köldbryggor, t ex balkongplattor, blir, som förut nämnts, inverkan ganska stor även vid isolering på utsidan. Det är därför motiverat att räkna med dessa vid bedömning av effekten av en utvändig tilläggsisolering. Att differentiera köldbryggornas inverkan med hänsyn till isolertjockleken har inte ansetts motiverat främst på grund av att de totala effekterna är små. Principiellt sett är inverkan av isolertjockleken på utsidan samma som vid isolering på insidan, beroende på den definition som valts för det extra värmeflödet. Då köldbryggorna totalt sett har en betydligt mindre inverkan vid utvändig än vid invändig tilläggsisolering kan det vara motiverat att använda tabellvärdena för utvändig tilläggsisolering som en överslagsberäkning för isolertjocklekar 5 - 12 cm. Alla bjälklags- och innerväggsanslutningar kan anses ha en försumbar inverkan vid utvändig tilläggsisolering av ytterväggen varför tabellvärdena i dessa fall satts lika med noll.

I tabellen anges ett område som det extra värmeflödet ligger inom. Kraftiga och breda köldbryggor bör givetvis ligga nära det övre gränsvärdet.

och tunnare och svagare köldbryggor bör ligga nära det undre gränsvärdet. Gränserna är inte avsedda att betraktas som extremvärden.

TABELL 2.7. Extra värmeflödet p g a köldbryggor i tilläggsisolerade ytterväggar.

Bjälklags- och innerväggsanslutningar

Konstruktion	Extra värmeflöde (W/mK)		
	Utan tilläggsisolering	7 cm inv tilläggsisolering	Utvändig tilläggsisolering
1 Tegelmurverk med anslutande betongbjälklag eller innervägg av betongblock	0,01 - 0,07	0,30 - 0,35	0
2 Tegelmurverk med anslutande träbjälklag eller icke bärande innervägg av trä eller plattor	-0,1 - 0	0,01 - 0,05	0
3 Tegelmurverk med anslutande bärande tegelinnerväggar	0	0,20 - 0,25	0
4 Tegelmurverk invändigt isolerat med 2 - 5 cm träullsplatta, anslutande betongbjälklag eller innervägg av betongblock	0,20 - 0,30	0,30 - 0,40	0
5 Tegelmurverk invändigt isolerat med träullsplatta anslutande bärande tegelinnerväggar	0,10 - 0,15	0,20 - 0,25	0
6 Gasbetongmurverk med anslutande betongbjälklag eller innervägg av betongblock	0,01 - 0,07	0,15 - 0,20	0
7 Utvändigt gasbetongisolerade betongväggar med anslutande bjälklag eller innervägg av betong	0,01 - 0,02	0,25 - 0,30	0
8 Träväggar, anslutande bjälklag och innervägar av trä	-0,1 - -0,05	0,03 - 0,05	0

TABELL 2.7. Extra värmefflöde p g a köldbryggor i tilläggsisolerade ytterväggar.

Balkongplattor			
Konstruktion	Extra värmefflöde (W/mK)		
	Utan tilläggs- isolering	7 cm inv till- läggsisolering	Utvändig till- läggsisolering
9 Balkongplattor av betong genom tegel-gasbetongmurverk	0,20 - 0,30	0,35 - 0,40	0,40 - 0,45
10 Balkongplatta av betong genom utvändig gasbetongisolerad betong	0,45 - 0,55	0,45 - 0,55	0,55 - 0,60
Fönstersmygar			
Konstruktion	Extra värmefflöde (W/mK)		
	Utan tilläggs- isolering	7 cm inv till- läggsisolering	Utvändig till- läggsisolering
11 Fönstersmyg i tegelmurverk	0,10 - 0,15	0,20 - 0,30	0,20 - 0,30
12 Fönstersmyg i gasbetongmurverk	0,02 - 0,05	0,07 - 0,10	0,07 - 0,10
13 Fönstersmyg i utvändigt lättbetongisolerad betongvägg	ca 0,10	0,15 - 0,20	0,15 - 0,20
Ytterväggshörn			
Konstruktion	Extra värmefflöde (W/mK)		
	Utan tilläggs- isolering	7 cm inv till- läggsisolering	Utvändig till- läggsisolering
14 Ytterväggshörn i stenväggar med kraftigast isolering invändigt	0,02 - 0,07		
15 Ytterväggshörn i stenväggar med kraftigast isolering utvändigt	0,15 - 0,25		

2.6 INVERKAN AV KÖLDBRYGGOR PÅ TRANSMISSIONSFÖRLUSTER GENOM YTTERVÄGGAR

I detta avsnitt har exempel på sammanlagd inverkan av köldbryggor beräknats för väggtyperna A, B, C och D.

För dessa väggtyper har beräkningen gjorts för ett väggfält av en viss storlek innehållande fönster. Aktuella köldbryggor är då fönstersmyg,

bjälklagsanslutning och innerväggsanslutning. Inverkan av dessa har beräknats som

$$Q_e = (\sum q_e \cdot l_{kb}) \cdot \Delta\vartheta$$

$\Delta\vartheta$ har satts till 40 °C. q_e och l_{kb} är extra värmeflödet respektive längden för de olika köldbryggorna. Det totala värmeflödet genom ytterväggar beräknas sedan som

$$Q_{tot} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta + Q_e$$

där k är väggens k -värde utan hänsyn till köldbryggor.

Då väggfältet innehåller fönster, räknas det extra värmeflödet p g a fönstersmygen till ytterväggen och fönstret räknas inte med i det totala värmeflödet.

Ett effektivt k -värde för ytterväggen inklusive köldbrygga beräknas sedan som

$$k_{eff} = \frac{Q_{tot}}{A \cdot \Delta\vartheta}$$

Detta jämförs sedan för olika isolertjocklekar med det nominella k -värdet för ytterväggen.

I FIG 2.13 visas ett ytterväggfält, typ A, med yttermått 3,20 x 4,00 m². Innermått är (3,20 - 0,21) x (4,00 - 0,27) m². I yttermått inräknas alltså bredden av en bjälklagsanslutning och en innerväggsanslutning. Ytterväggen innehåller ett fönster, 1,20 x 1,40 m². Bjälklaget är ett 16 cm betongbjälklag med ½-stens upplag i väggen och innerväggen är en 1-stens tegelvägg. TAB 2.8 visar värmeflödet genom väggen samt "nominellt" och "effektivt" k -värde med och utan invändig tilläggsisolering av väggen.

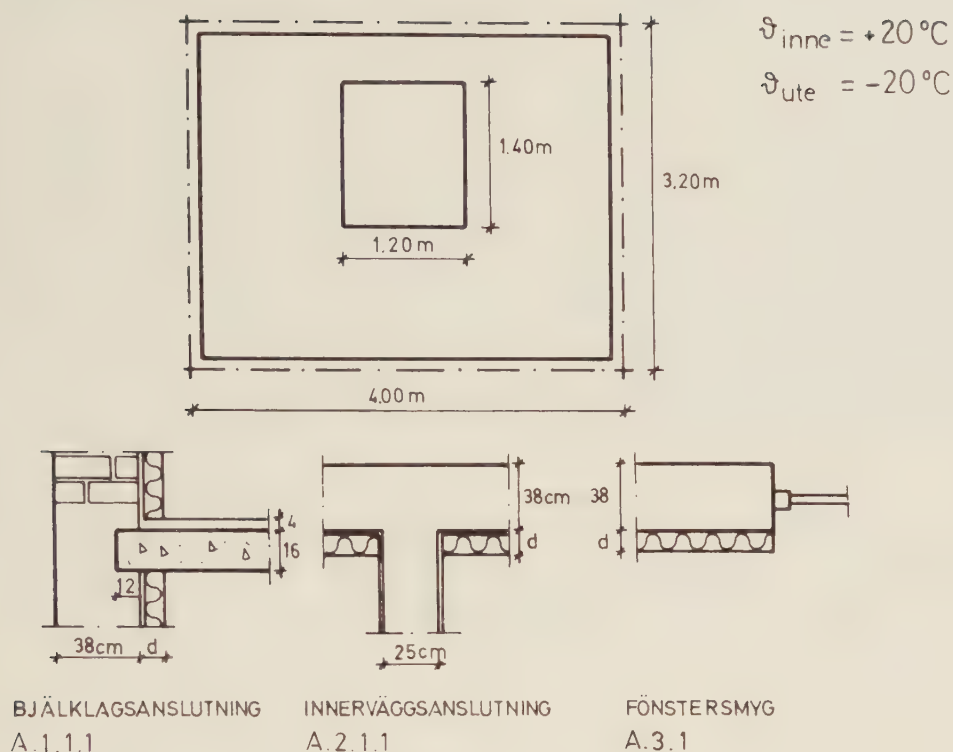


FIG 2.13. Väggfält med köldbryggor, $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg.

TABELL 2.8. Värmeförluster genom väggfältet i FIG 2.13 vid $\vartheta_{\text{inne}} = +20^{\circ}\text{C}$ och $\vartheta_{\text{ute}} = -20^{\circ}\text{C}$.

Invändig isolering (cm)	$Q_A (=k \cdot A \cdot 40)$ (W)	$Q_e (= \sum q_e \cdot l_{kb} \cdot 40)$ (W)	$Q_{\text{tot}} (=Q_A + Q_e)$ (W)	Q_e/Q_{tot} %	k_{nom} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	k_{eff} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	533,8	34,3	568,1	6,0	1,20	1,28
5	226,8	120,1	346,9	34,6	0,51	0,78
7	186,8	130,5	317,3	41,1	0,42	0,71
10	146,8	144,4	291,2	49,6	0,33	0,65
12	129,0	149,2	278,2	53,6	0,29	0,63
15	111,2	151,7	262,9	57,7	0,25	0,59

Av tabellen framgår bland annat att vid invändig tilläggsisolering med 10 cm mineralull mellan reglar c 60 cm + invändig gipsskiva, utgör det beräknade värmeflödet genom köldbryggorna ca 50% av det totala värmeflödet genom väggen. Det effektiva k-värdet är i det närmaste dubbelt så stort som det nominella. Det är tydligt att köldbryggornas inverkan på värmeför-

lusterna får en relativt sett starkt ökande betydelse då tilläggsisoleringens tjocklek ökar. Detta bör man ta hänsyn till då energibesparingen beräknas.

Vid utvändig tilläggsisolering av ytterväggen kommer inverkan av bjälklags- och innerväggsanslutningen att bli försumbara, medan fönstersmygen ger ett tillskott till värmeförlusterna, som ökar med isolertjockleken. I TAB 2.9 har gjorts motsvarande beräkning som i TAB 2.8 för 5 och 10 cm utvändig tilläggsisolering, med en ytterbeklädnad som för enkelhetens skull antas ha samma värmemotstånd som en 13 mm gipsskiva.

TABELL 2.9. Värmeförluster vid utvändig tilläggsisolering av väggfältet i FIG 2.13. $\vartheta_{\text{inne}} = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ och $\vartheta_{\text{ute}} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Utvändig isolering (cm)	Q_A (W)	Q_e (W)	Q_{tot} (W)	Q_e/Q_{tot} %	k_{nom} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	k_{eff} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	533,8	34,3	568,1	6,0	1,20	1,28
5	226,8	44,2	271,0	16,3	0,51	0,61
10	146,8	56,8	203,6	27,9	0,33	0,46

I FIG 2.12 visas jämförelsen mellan utvändig och invändig tilläggsisolering med samma tjocklek. Det effektiva k-värdet är avsatt som funktion av isolertjockleken. Det nominella k-värdet är också inlagt i figuren. För utvändig isolering tjockare än 10 cm har extrapolering gjorts.

Vid bedömning av lönsamheten för in-respektive utvändig isolering måste man givetvis ta hänsyn till att mera isoleringsmaterial används då isoleringen görs på utsidan.

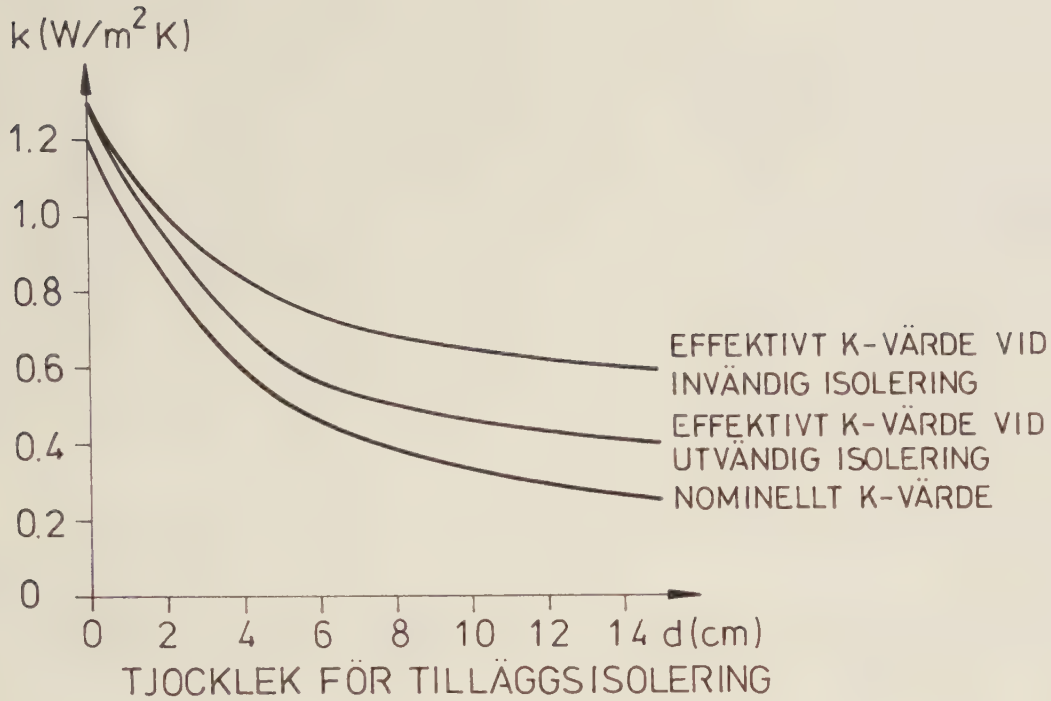
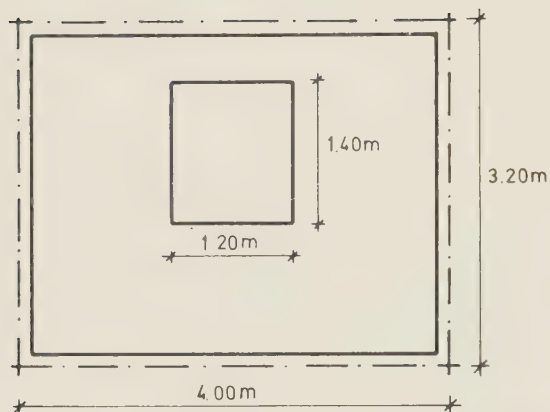


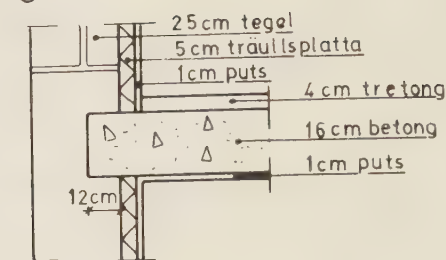
FIG 2.14. Effektivt k-värde för ytterväggsfält innehållande köldbryggor, vid in- respektive utvändig tilläggsisolering av ytterväggen.

Motsvarande beräkningar visas för väggtyp B i FIG 2.15 och TAB 2.10, för väggtyp C i FIG 2.16 och TAB 2.11 samt för väggtyp D i FIG 2.17 och TAB 2.12. Här har endast invändig tilläggsisolering tagits med.

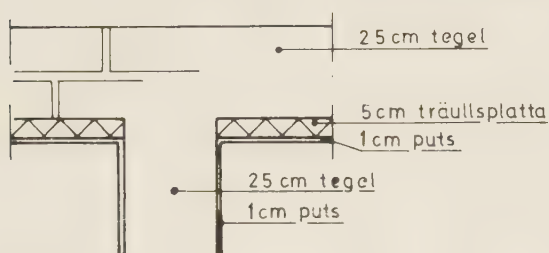


$\vartheta_{\text{inne}} = +20^{\circ}\text{C}$

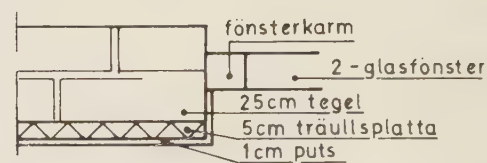
$\vartheta_{\text{ute}} = -20^{\circ}\text{C}$



B.1.1.1



B.2.1.1

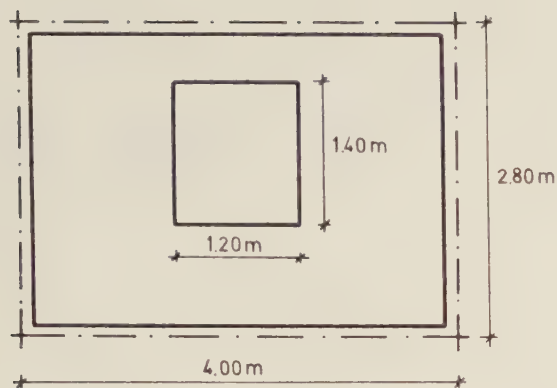


B.3.1

FIG 2.15. Väggfält med köldbryggor, 1-stens tegelvägg med 5 cm träulls-platta invändigt.

TABELL 2.10. Värmeförluster genom väggfältet i FIG 2.15 vid $\vartheta_{\text{inne}} = +20^{\circ}\text{C}$ och $\vartheta_{\text{ute}} = -20^{\circ}\text{C}$.

Invändig isolering (cm)	$Q_A (k \cdot A \cdot 40)$ (W)	$Q_e (= \sum q_e \cdot l_{kb} \cdot 40)$ (W)	$Q_{\text{tot}} (= Q_A + Q_e)$ (W)	Q_e / Q_{tot} %	k_{nom} (W/m ² K)	k_{eff} (W/m ² K)
0	360,3	93,2	453,5	20,6	0,81	1,02
5	186,8	137,2	324,0	42,3	0,42	0,73
7	160,1	141,6	301,7	46,9	0,36	0,68
10	129,0	145,2	274,2	53,0	0,29	0,62
12	115,6	146,8	262,4	55,9	0,26	0,59
15	97,9	146,4	244,3	59,9	0,22	0,55



$\vartheta_{\text{inne}} = +20^{\circ}\text{C}$
 $\vartheta_{\text{ute}} = -20^{\circ}\text{C}$

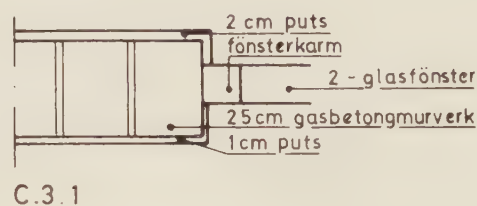
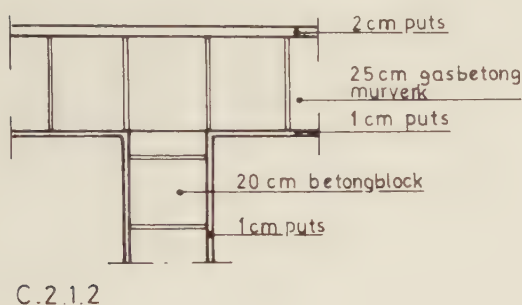
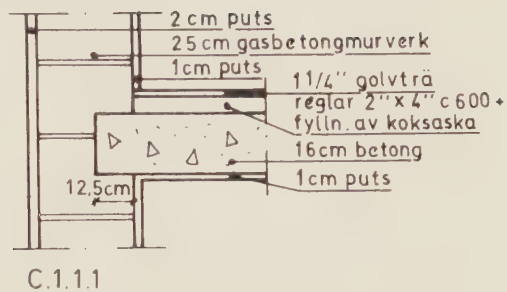


FIG 2.16. Väggfält med köldbryggor, 250 mm murad gasbetongvägg.

TABELL 2.11. Värmeförluster genom väggfältet i FIG 2.16 vid $\vartheta_{\text{inne}} = +20^{\circ}\text{C}$ och $\vartheta_{\text{ute}} = -20^{\circ}\text{C}$.

Invändig isolering (cm)	$Q_A (=k \cdot A \cdot 40)$ (W)	$Q (= \sum q_e \cdot l_{kb} \cdot 40)$ (W)	$Q_{\text{tot}} (=Q_A + Q_e)$ (W)	Q_e / Q_{tot} %	k_{nom} (W/m ² K)	k_{eff} (W/m ² K)
0	285,6	14,2	299,8	4,7	0,75	0,79
5	156,1	49,3	205,4	24,0	0,41	0,54
7	133,3	55,9	189,2	29,5	0,35	0,50
10	106,6	61,6	168,2	36,6	0,28	0,44
12	95,2	63,1	158,3	39,9	0,25	0,42
15	83,8	64,9	148,7	43,6	0,22	0,39

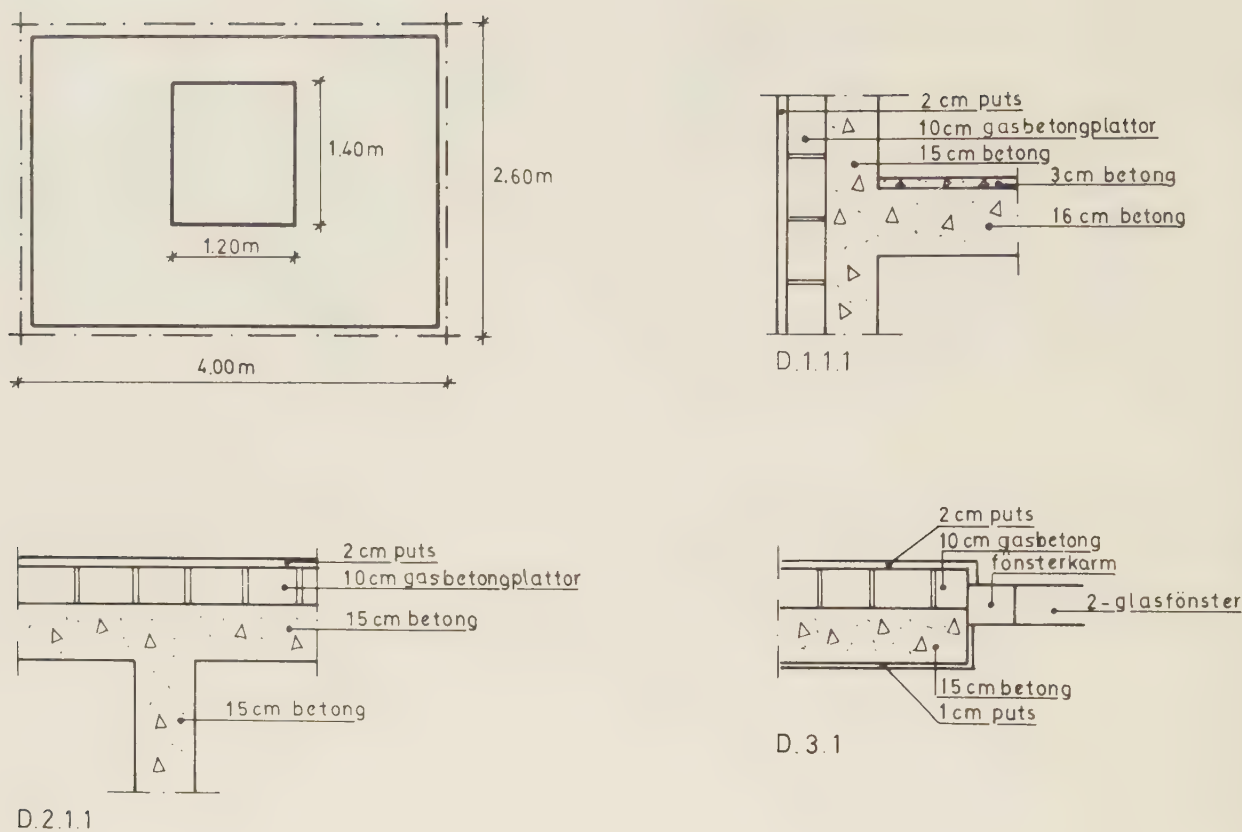


FIG 2.17. Väggfält med köldbryggor, 150 mm betongvägg med 100 mm utvändig gasbetong.

TABELL 2.12. Värmeförluster genom väggfältet i FIG 2.17 vid $\vartheta_{inne} = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ och $\vartheta_{ute} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Invändig isolering (cm)	$Q_A (=k \cdot A \cdot 40)$ (W)	$Q_e (= \sum q_e \cdot l_{kb} \cdot 40)$ (W)	$Q_{tot} (=Q_A + Q_e)$ (W)	Q_e / Q_{tot} %	k_{nom} (W/m ² K)	k_{eff} (W/m ² K)
0	352,2	24,4	376,6	6,5	1,01	1,08
5	163,9	96,2	260,1	37,0	0,47	0,75
7	136,0	103,1	239,1	43,1	0,39	0,69
10	108,2	115,7	223,9	51,7	0,31	0,64
12	97,7	120,7	218,4	55,3	0,78	0,63
15	83,7	125,7	209,4	60,0	0,24	0,60

Ett annat sätt att se på köldbryggornas inverkan är att beräkna energibesparingen på grund av tilläggsisolering under en genomsnittlig eldnings-säsong. För en enkel beräkning kan det s k graddagtalet, Q , användas. Energibesparingen på grund av tilläggsisolering av en byggnadsdel blir då

$$\Delta E = (k_f - k_e) \cdot A \cdot Q$$

k_f och k_e är byggnadsdelens k -värde före respektive efter isoleringen.

Om man antar att ytterväggen är en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg med köldbryggor och genomsnittligt avstånd mellan dessa som i FIG 2.13, samt att totala ytterväggsytan är 1200 m^2 fås resultatet i FIG 2.18. Denna visar förväntad energibesparing utan hänsyn till köldbryggor samt med köldbryggor vid invändig tilläggsisolering med olika tjocklek.

ENERGIBESPARING (MWh/ÅR)

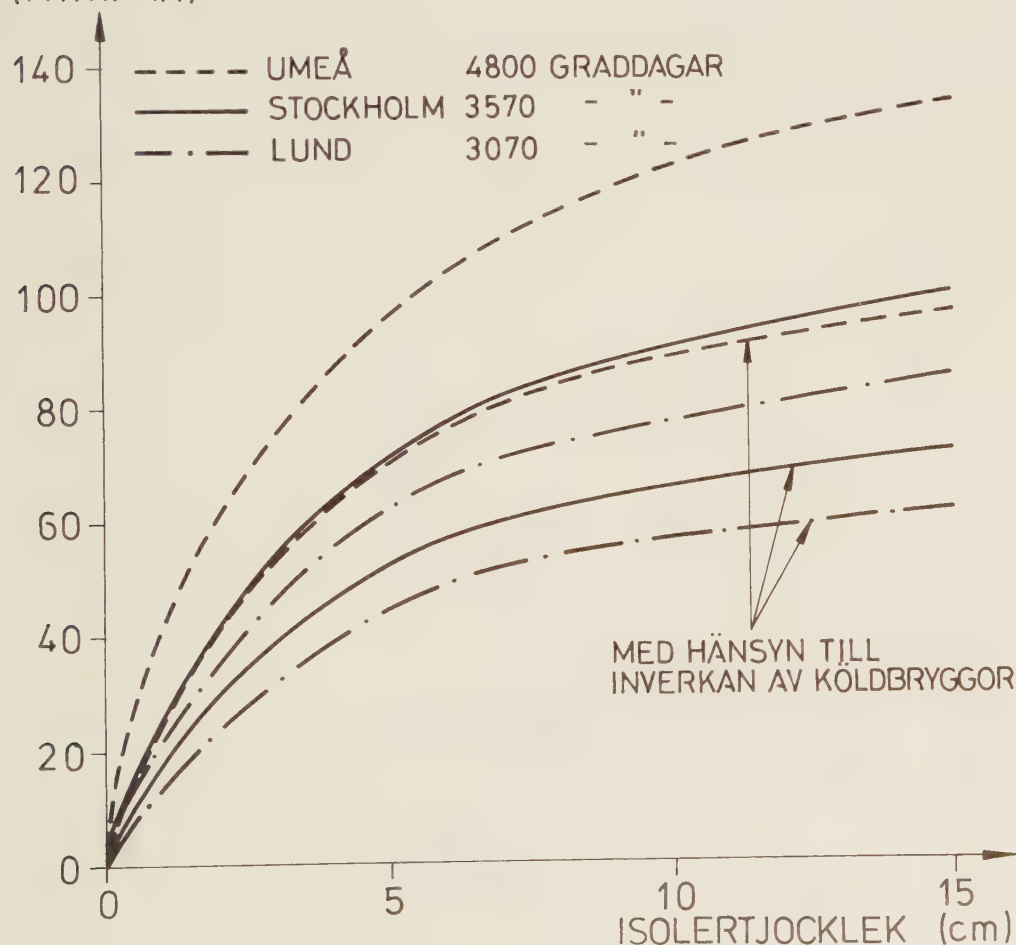


FIG 2.18. Energibesparing vid invändig isolering av vägg enligt FIG 2.13. Med och utan hänsyn till köldbryggor. 1200 m^2 .

3 YTKONDENSATION VID KÖLDBRYGGOR

3.1 TILLÄGGSISOLERINGENS INVERKAN PÅ TEMPERATURFÖRDELNINGEN VID KÖLDBRYGGOR

I KAP 2 diskuterades köldbryggornas inverkan på värmeförlusterna genom byggnadsdelar. Köldbryggorna medför också lokala temperatursänkningar och därmed andra negativa konsekvenser. Risken för ytkondensation och ojämn nedsmutsning ökar. De kalla ytorna sänker också den operativa temperaturen inomhus.

I TAB 2.4 har, förutom extra värmeflöde, också redovisats lägsta beräknade yttemperatur vid köldbryggorna. Lägsta yttemperaturen sjunker vid aktuella temperaturförhållanden någon grad då invändig isolering görs. Inverkan är störst för fönstersmygarna, där isoleringen antagits göras med en ganska ogynnsam utformning. Om isoleringstjockleken ökas över, i dessa fall, 5 cm, stiger yttemperaturen något vid köldbryggor av typen bjälklagsanslutning. I FIG 3.1 visas lägsta beräknade yttemperatur som funktion av invändig isoleringstjocklek för några anslutningar. Inverkan av värmeövergångskoefficienten har också tagits med för bjälklagsanslutning A.1.1.1 enligt de schematiska fallen i TAB 2.3.

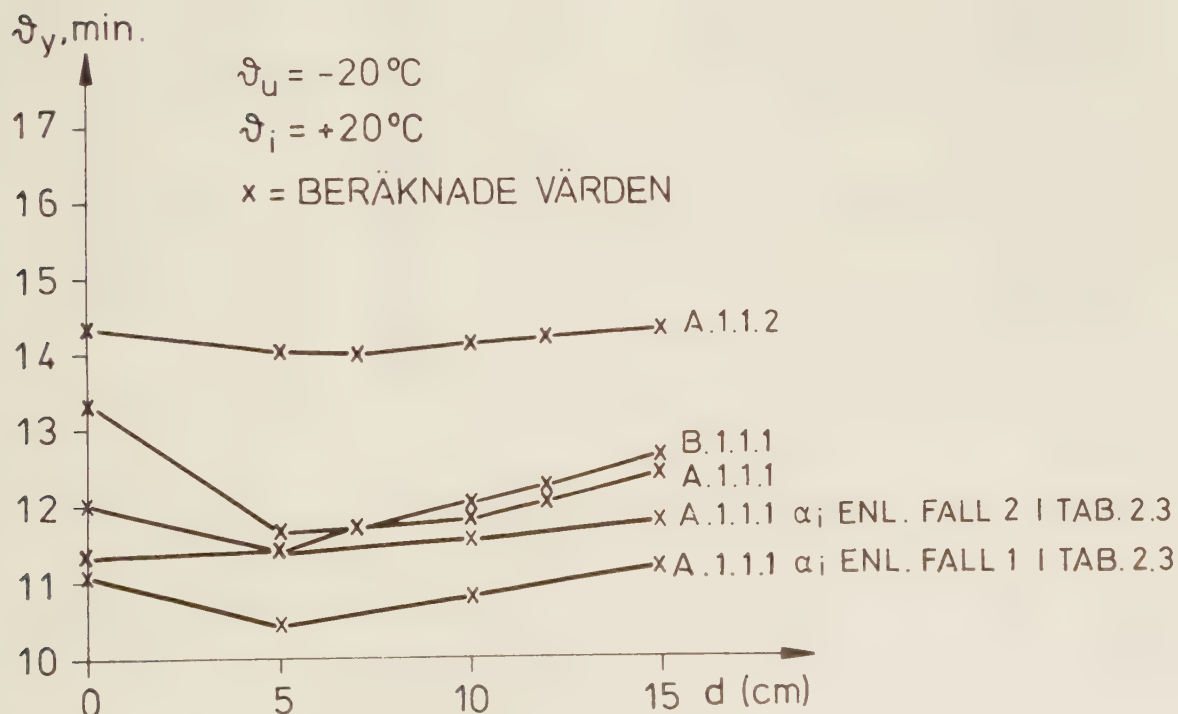


FIG 3.1. Lägsta beräknade yttemperatur vid några bjälklagsanslutningar med invändig tilläggsisolering 0 - 15 cm mineralull.

Skillnaden mellan A.1.1.1 och A.1.1.2 är endast en kantisolering av betongbjälklaget.

Yttemperatursänkningen då väggen isoleras invändigt beror på att skillnaden i värmeledningsförmåga mellan isoleringen och betongen är så stor. Motsvarande effekt förekommer inte då bjälklaget är av trä, anslutning A.1.2.1 i TAB 2.4. Ökning av isoleringstjockleken medför att en ökad längd bjälklagsplatta kan medverka som en liten "isolering" på själva köldbryggan. Effekten av detta är liten, men märkbar. I FIG 3.2 visas isotermbilder av bjälklagsanslutning A.1.1.1 med 0 och 5 cm invändig tilläggsisolering. Siffrorna på isotermlinjerna anger temperaturen i $^{\circ}\text{C}$. Inne- och utetemperaturen är $+20^{\circ}\text{C}$ respektive -20°C .

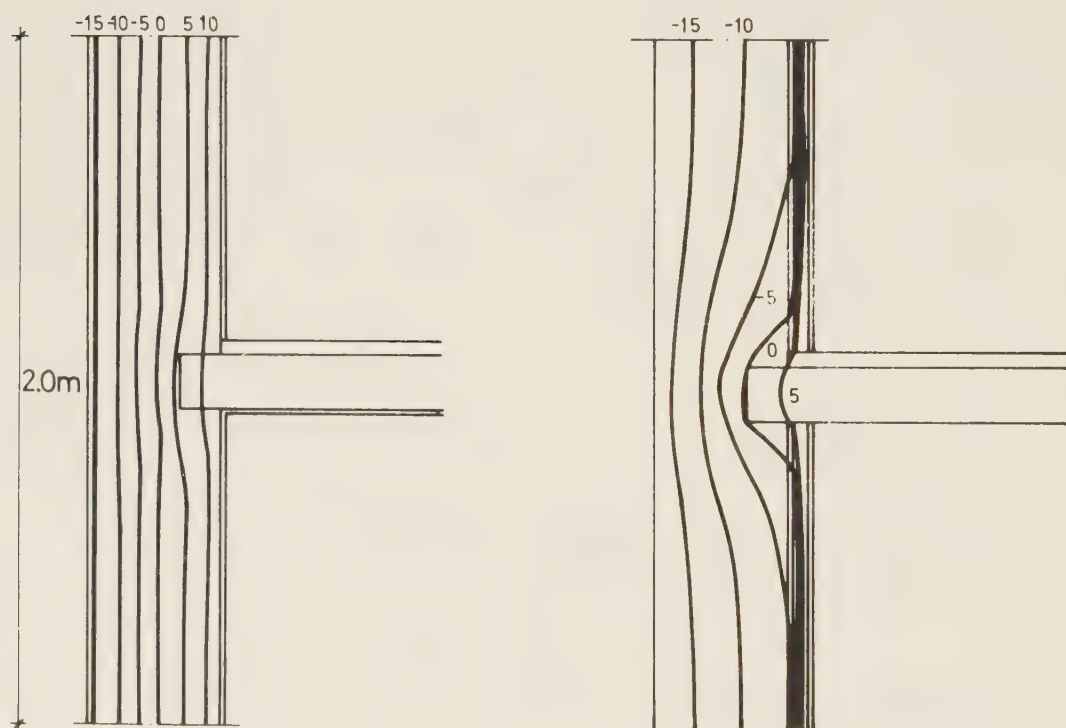


FIG 3.2. Temperaturfält vid bjälklagsanslutning A.1.1.1. med a) ingen invändig tilläggsisolering b) 5 cm invändig tilläggsisolering.

Av intresse är också temperaturfördelningen över en större yta, t ex golvet i närheten av en köldbrygga, eftersom tilläggsisoleringen eventuellt

kan ha inflytande på behagligheten hos inomhusklimatet. I FIG 3.3 har yttemperaturfördelningen på golvet ovansida och en del av väggens inneryta projicerats på en rät linje för fall A.1.1.1 med 0 och 5 cm invändig tilläggsisolering.

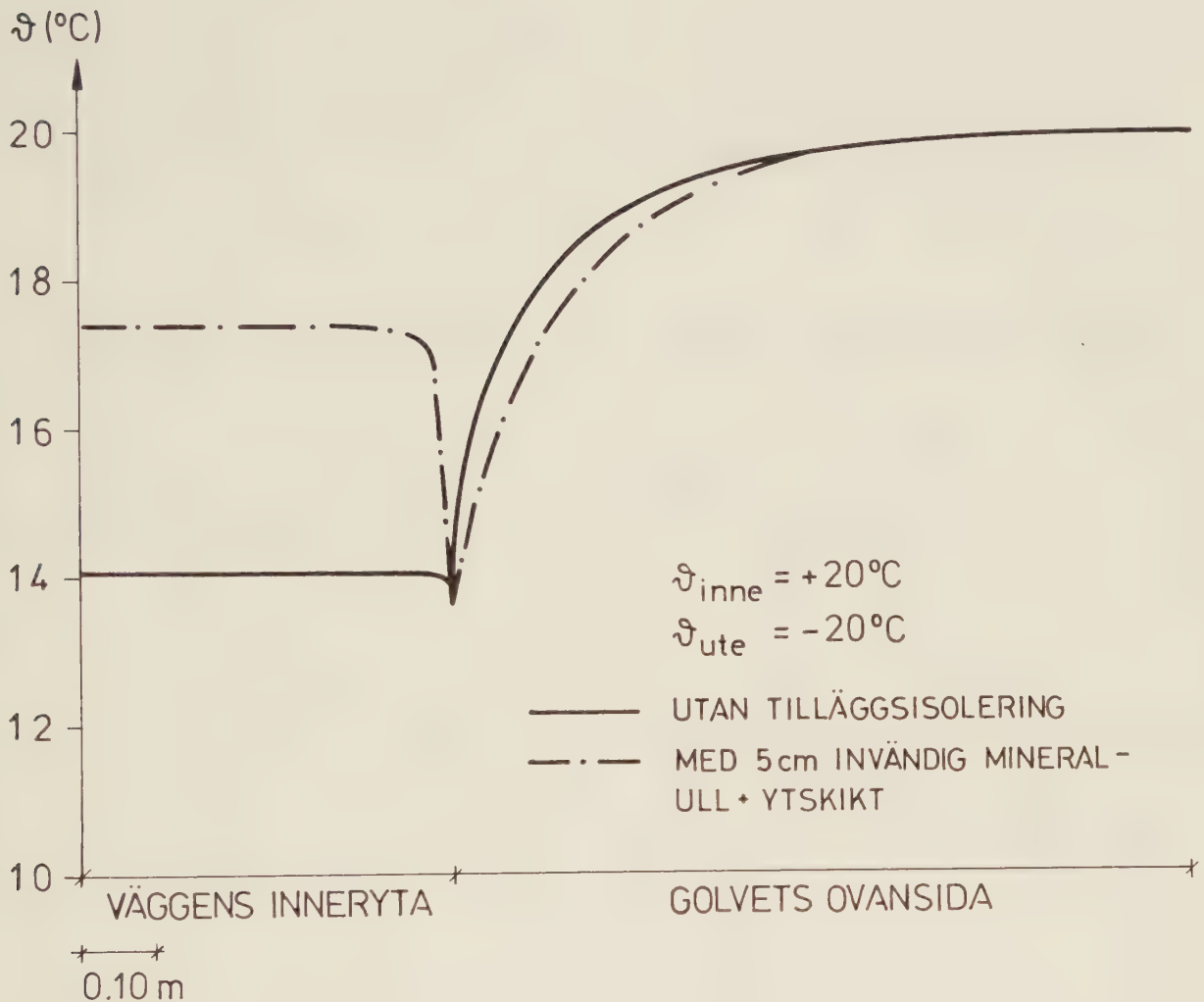


FIG 3.3. Yttemperatur på golv och del av yttervägg, köldbrygga A.1.1.1 med och utan invändig tilläggsisolering.

Köldbryggans inflytande på golvtemperaturen är märkbart en relativt lång bit från ytterväggen. Tilläggsisoleringen ger en temperatursänkning som är ganska liten, men märkbar, inom ett område, i detta fall ca 40 cm

från väggen. Av de boende kan det kanske upplevas som egendomligt att golvtemperaturen sjunker då väggarna isoleras.

Fönstersmygar kan vara kraftiga köldbryggor. Yttemperaturen i en fönstersmyg är mycket beroende av hur anslutningen av tilläggsisoleringen görs. Ofta finns det inte plats att sätta någon isolering på smygens insidor, utan man måste avsluta isoleringen jäms med smygens befintliga insida. FIG 3.4 visar hur temperaturförhållandena blir i ett sådant fall, för en smyg i en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg. Tilläggsisoleringen antas vara 10 cm tjock, $\lambda = 0,047 \text{ W/mK}$, samt beklädnad med 13 mm gipsskiva. I praktiska fall måste fönstersmygen fodras på något sätt.

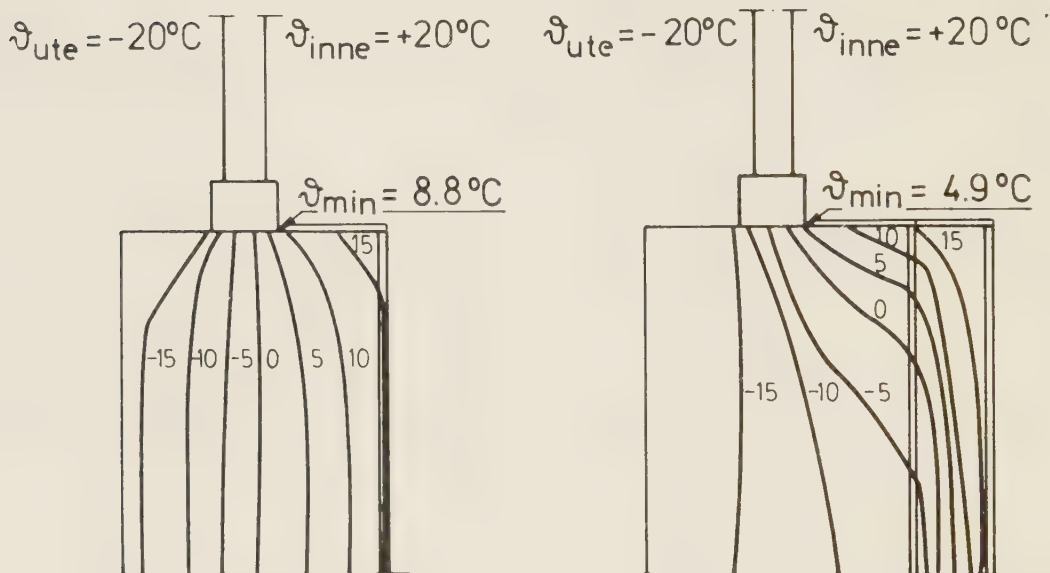


FIG 3.4. Temperaturfält i fönstersmyg med och utan invändig tilläggsisolering.

I det ovan beräknade fallet antogs karmen vara centriskt placerad i fönstersmygen. Två alternativa placeringar har betraktats, och resultatet visas i TAB 3.1.

TABELL 3.1. Extra värmefflöde och lägsta beräknade yttemperatur vid olika placering av karmen i fönstersmygen

Köldbrygga	Invändig isolering (cm)	q_e (W/mK)	$\vartheta_{\min}$ (°C)
A.3.1. centrisk placering	0	0,12	8,8
A.3.1 inre 1/4-delspunkten	0	0,11	11,6
A.2.1. yttre 1/4 -delspunkten	0	0,12	7,8

För fönstersmygen i den massiva tegelväggen har ett par olika lösningar studerats. FIG 3.5 visar tre olika lösningar av smygens isolering, och beräknade temperaturer och extra värmefflöden visas i TAB 3.2. Alternativ 1 innebär att en 9 mm träfiberskiva sätts direkt mot den invändiga ytan. I alternativ 2 har träfiberskivan spikats mot en smal list, så att det finns ett luftmellanrum som är 5 mm mellan invändig puts och träfiberskivan. I alternativ 3 har smygen isolerats med 2 cm mineralull, $\lambda = 0,041$ W/mK, och täckts med en 9 mm träfiberskiva. Karmen antas för alla alternativen vara centriskt placerad i smygen.

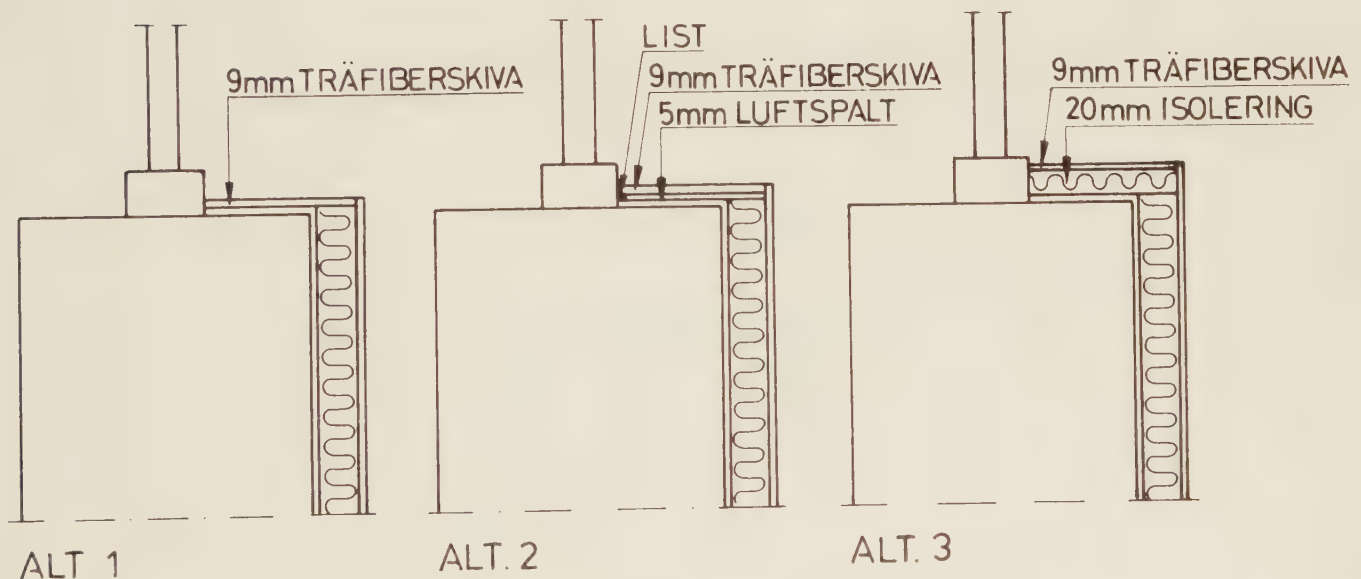


FIG 3.5. Olika alternativ för anslutning av invändig isolering till fönstersmyg i 1½-stens tegelvägg.

TABELL 3.2. Extra värmefflöde och lägsta beräknade yttemperaturer för fönstersmygarna i FIG 3.4.

Köldbrygga	Invändig isolering (cm)	q_e (W/mK)	$\vartheta_{\min}$ (°C)
A.3.1. alt 1	5	0,15	9,5
A.3.1. alt 2	5	0,12	10,4
A.3.1. alt 3	5	0,08	12,2

Vid den allra ogynnsammaste utformningen, dvs där ingen ytbeklädnad sätts i själva fönstersmygen, visas i FIG 3.6 för väggtyp A, B, C och D lägsta yttemperaturer som funktion av tjocklek hos invändig tilläggsisolering. Här har också tagits med fallet med α enligt FIG 2.10.

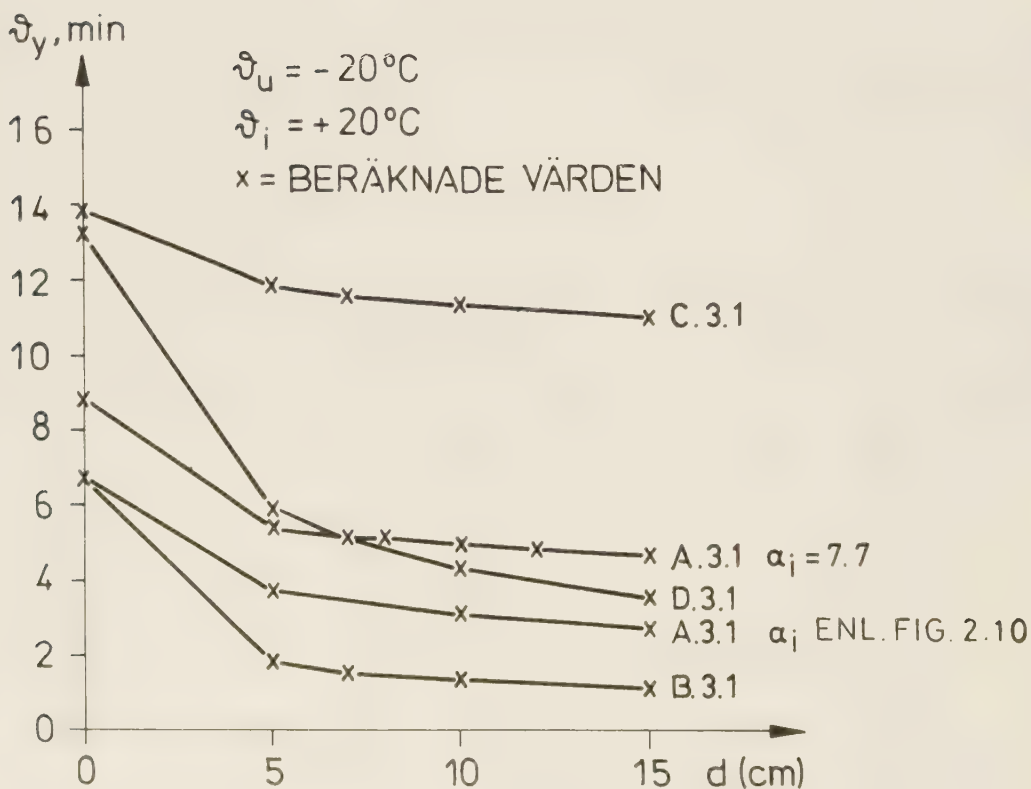


FIG 3.6. Lägsta beräknade yttemperatur i fönstersmygar med invändig tilläggsisolering 0 - 15 cm.

3.2 RISK FÖR YTKONDENSATION

Då temperaturen på en yta är lägre än omgivande lufts mättnadstemperatur kondenserar vattenånga på ytan. Härvid frigörs värmemängden q_{kond} , vilket medför att yttemperaturen stiger.

$$q_{\text{kond}} = g \cdot r$$

r = ångbildningsvärmets (J/kg)

g = fuktflödet till ytan ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

$$g = \beta(v_{\text{luft}} - v_y)$$

β = diffusionsövergångskoefficient (m/s)

v_{luft}, v_y = ånghalten i luften respektive på ytan (kg/m^3)

Fuktflödet, g , blir en funktion av tiden, eftersom ytkondensation verkar avfuktande på den omgivande luften. Kondensation kommer att pågå tills omgivande lufts ånghalt sjunkit precis till mättnadsånghalten vid ytan. Totala fuktflödet till ytan har då varit

$$G = (v_{\text{luft}, 0} - v_y) \cdot V \quad (\text{kg})$$

Där index 0 anger ånghalten i utrymmet vid kondensationens början och V är utrymmets volym.

Om inneluftens ånghalt sjunker ytterligare kommer fukt att avdunsta från ytan. Ytkondensation kan därmed verka som en buffert på luftfuktigheten inomhus (även om det är en icke önskvärd sådan).

Det ovan beskrivna icke stationära förloppet kan vara intressant om man i ett litet utrymme har förhållandevis stora ytor med låg temperatur, t ex växthus. I detta sammanhang betraktas problemet i fortsättningen stationärt, vilket kan motiveras av att det är skillnaden mellan två tillstånd som är intressant, konstruktioner med och utan invändig tilläggsisolering.

Kondensationens inverkan på yttemperaturen kan approximativt beräknas genom att man definierar ett värmeövergångstal på grund av kondensation, α_{kond} , och sätter

$$\alpha_{\text{tot}} = \alpha_s + \alpha_k + \alpha_{\text{kond}}$$

vilket är en förenkling.

För filmkondensation kan man använda olika samband mellan konvektionsövergångskoefficienten och diffusionsövergångskoefficienten.

Lewis (1922) angav att

$$\beta = \frac{\alpha_k}{\rho \cdot c_p}$$

ρ = luftens densitet (kg/m^3)

c_p = luftens specifika värmekapacitet ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)

I följande resonemang har detta samband använts.

$$\text{Eftersom } \alpha_{\text{kond}} = \frac{q_{\text{kond}}}{\vartheta_{\text{luft}} - \vartheta_y}$$

$$\text{blir } \alpha_{\text{tot}} = \alpha_s + \alpha_k \left(1 + \frac{r}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\vartheta_{\text{luft}} - \vartheta_y}{\vartheta_{\text{luft}} - \vartheta_y} \right)$$

För endimensionella fall kan yttemperaturen enkelt beräknas genom passningsräkning. I de aktuella fallen har ingen bedömning av inverkan gjorts, eftersom det inte ansetts lönsamt vid flerdimensionella beräkningar. Ytttemperaturen kan inte höjas momentant, utan kondensation kommer att inträffa vid den först beräknade temperaturen. Temperaturhöjningen får sedan inflytande på kondenserad mängd, som blir mindre än om den beräknas med den ursprungliga temperaturen.

Storleksordningen av temperaturhöjningen har emellertid kontrollerats med beräkning på en endimensionell konstruktion vars värmemotstånd antagits vara 0,2 respektive 0,5 $\text{m}^2\text{K/W}$. Det förra fallet motsvaras ungefär av ett tvåglasfönster.

Följande beräkningsvärden har använts

$$\alpha_u = 16 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_{si} = 4 \text{ "}$$

$$\alpha_{ki} = 4 \text{ "}$$

$$r = 2500 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

$$\rho \cdot c_p = 1,2 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3 \text{ K}$$

$$\vartheta_i = +20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_u = -20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Index i och u betecknar inne- respektive uteklimat. Ånghalten vid ytan har förutsatts vara lika med mättnadsånghalten. Resultatet, som funktion av luftfuktigheten inomhus, framgår av TAB 3.3.

TABELL 3.3. Beräknad inverkan av ytkondensation på yttemperatur.

$m = 0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$		$m = 0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$	
Yttemperatur före kondensation = = $7,1^\circ\text{C}$		Yttemperatur före kondensation = = $12,7^\circ\text{C}$	
ϕ_i (%)	Yttemperatur efter kondensation ($^\circ\text{C}$)	ϕ_i (%)	Yttemperatur efter kondensation ($^\circ\text{C}$)
40	ej kondens	40	ej kondens
50	7,4	50	"
60	8,3	60	"
70	9,2	70	13,1
80	10,0	80	14,0

Av exemplet kan man dra slutsatsen att inverkan är liten vid måttlig ånghalt inomhus. De värden på relativa fuktigheten som anges i tabellen är extremt höga för vinterklimat.

Risken för att ytkondensation överhuvudtaget skall inträffa kan bedömas genom att beräkna vid vilken luftfuktighet inomhus kondensation börjar.

Detta har gjorts för ett par fönstersmygar, vid olika utetemperatur, med lägsta yttemperaturen enligt de tvådimensionella beräkningarna, och visas i FIG 3.7 - 3.9. Anslutningen av isoleringen till fönstersmygen har antagits utförd på ogynnsammaste sätt, avslutad jäms med smygen utan extra fönstersmygisolering.

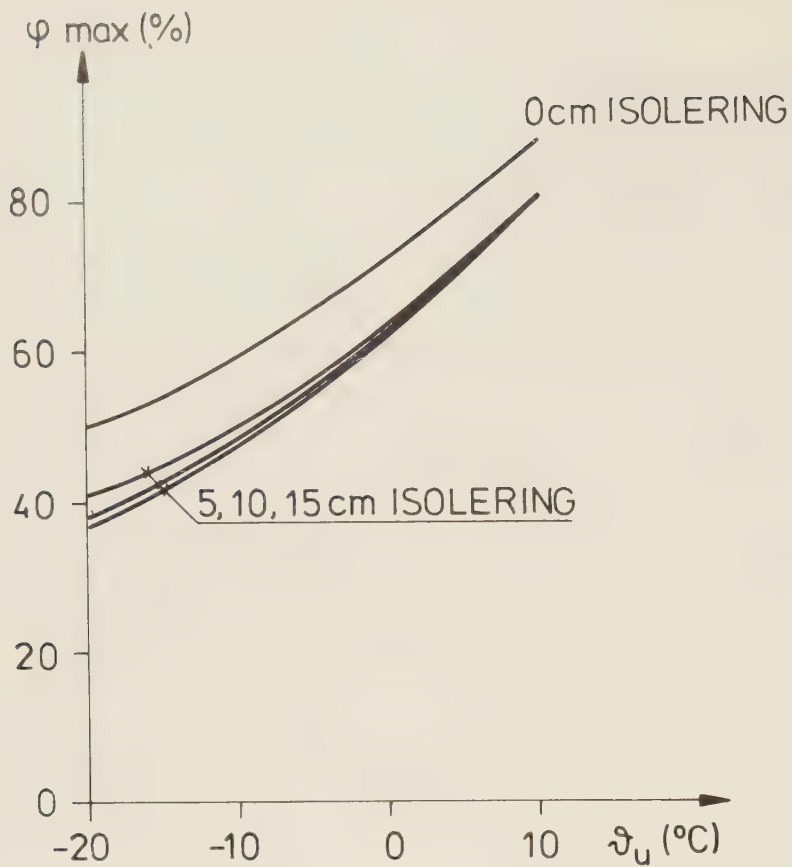


FIG 3.7. Fönstersmyg A.3.1. Högsta tillåtna relativa luftfuktighet inne, vid 20 $^{\circ}\text{C}$, för att kondensation ej skall inträffa, vid invändig tilläggsisolering. $\alpha_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

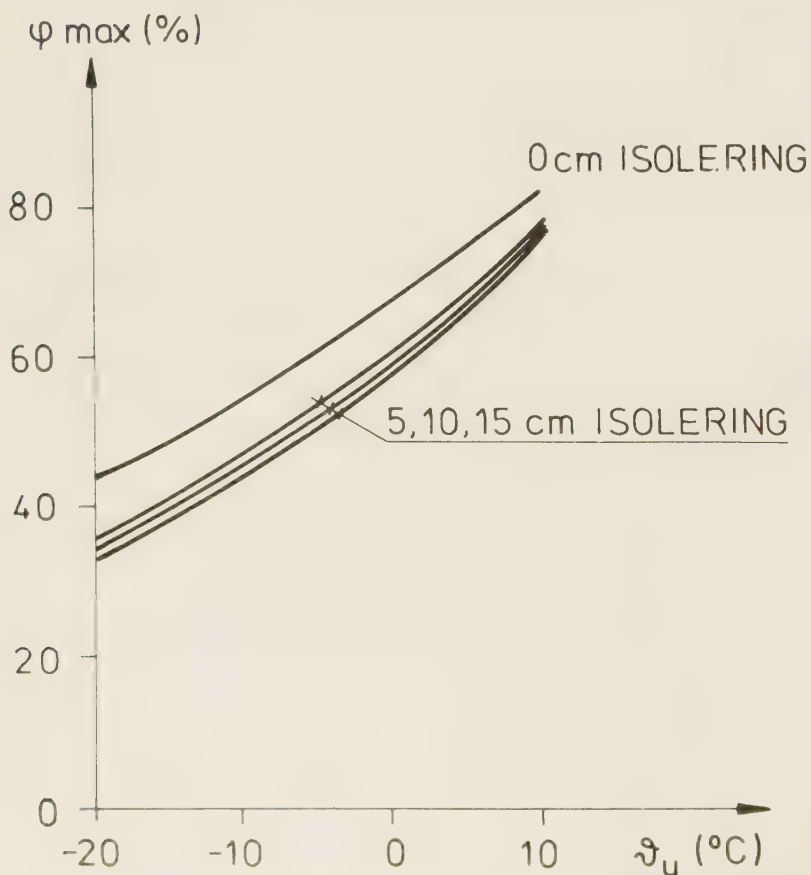


FIG 3.8. Fönstersmyg enligt ovan, med α_i enligt FIG 2.10.

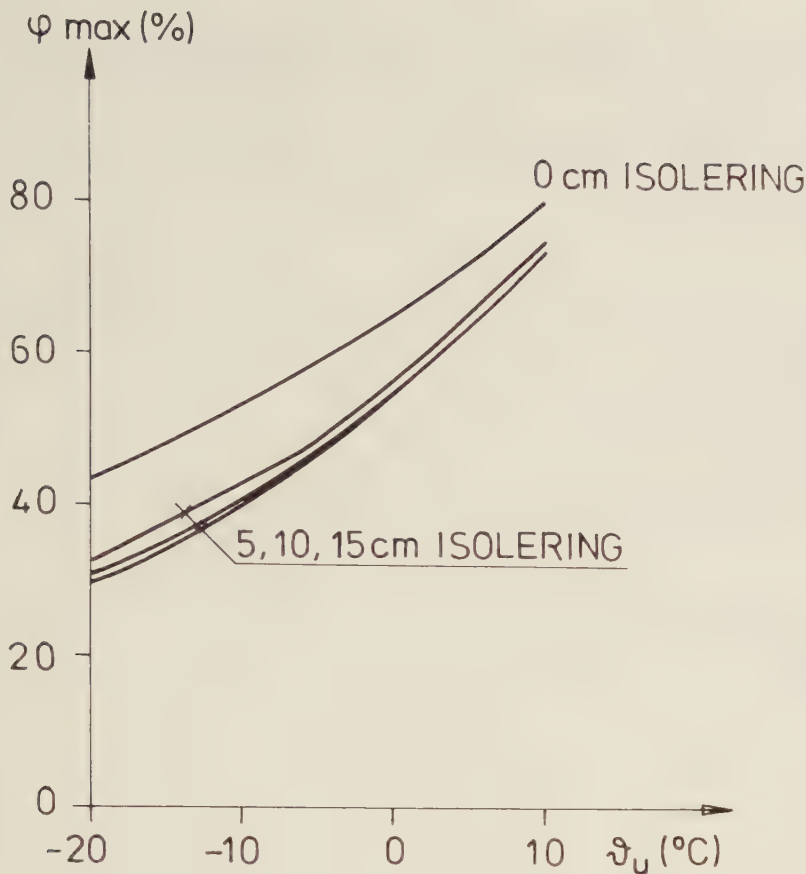


FIG 3.9. Fönstersmyg i 1-stens tegelvägg med 5 cm trällsplatta invändigt, B.3.1. Högsta tillåtna relativa luftfuktighet inomhus (vid $+20^{\circ}\text{C}$) för att kondensation ej skall inträffa, vid invändig tilläggsisolering med olika tjocklek. Yttertemperatur beräknad med $\alpha_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tilläggsisoleringens tjocklek har i de här fallen ganska liten inverkan på yttertemperaturen, och därmed tillåten relativ luftfuktighet inomhus. Skillnaden mellan oisolerad och tilläggsisolerad konstruktion är i de här fallen ca 10 - 15 procentenheter relativ luftfuktighet, vid utetemperaturer under 0°C .

Tillåten ånghalt inomhus vid -10°C ute blir, om man betraktar fönstersmygen i FIG 3.8 utan och med 10 cm invändig tilläggsisolering, $9,3 \cdot 10^{-3}$ respektive $6,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Om relativa luftfuktigheten utomhus är 90% innebär det att fukttillskottet inomhus får vara $7,4 \cdot 10^{-3}$ respektive $5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Detta är i båda fallen högre än vad man kan anta förekommer i normala bostadsutrymmen.

Den fuktmängd som kan kondensera under ett dygn med stationära förhållanden har beräknats för fönstersmygen enligt FIG 3.8 med 10 cm invändig tilläggsisolering av ytterväggen. Resultatet visas i TAB 3.4. Diffusionsövergångskoefficienten har satts till $2,8 \cdot 10^{-3}$ m/s.

TABELL 3.4. Kondenserad mängd under ett dygn på en yta med temperaturen lika med lägsta yttemperaturen i fönstersmyg enligt FIG 3.8. Invändig tilläggsisolering 10 cm ($\lambda = 0,047$ W/mK). Ingen speciell fönstersmygisolering.

ϕ_i (%)	Kondenserad mängd ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{dygn}$)		
	$\vartheta_u = -20^\circ\text{C}$	$\vartheta_u = -10^\circ\text{C}$	$\vartheta_u = 0^\circ\text{C}$
40	0,02	0	0
50	0,65	0,18	0
60	1,07	0,60	0,01

Kondenserad mängd ökar visserligen snabbt då relativa luftfuktigheten stiger, men med hänsyn till de något extrema klimatförhållanden som krävs för kondensmängder av någon betydelse skall bildas blir slutsatsen att ytkondensation inte bör vara något allvarligt problem i detta sammanhang.

En faktor som inte diskuterats ovan, men som kan öka risken för ytkondensation både i fönstersmygar och på fönster, är att värmeövergångsförhållandena förändras då smygen blir djupare. En invändig tilläggsisolering kan öka smygdjupet från t ex 10 till 20 cm. Strålningsövergången vid smygytorna och fönstrets ränder blir då mindre eftersom andra ytor i rummet, som bör vara varmare, rent geometriskt sett inverkar mindre. Att radiatorer under fönstret flyttas ut med isoleringen medför givetvis också ökad risk för ytkondensation.

4 FUKTTILLSTÄND I TILLÄGGSISOLERADE KONSTRUKTIONER - KONDENSATION

4.1 FUKTKÄLLOR OCH FUKTTTRANSPORTMEKANISMER

Aktuella fuktkällor för en byggnadsdel är luftfukt, nederbörd (slagregn), byggfukt, markfukt och eventuella läckage.

I samband med tilläggsisolering av en befintlig byggnadsdel är de intressanta fuktkällorna luftfukt och nederbörd samt markfukt om byggnadsdelen är en grundkonstruktion. Vid utvändigt tilläggsisolering kan nederbörd eventuellt betraktas som en typ av byggfukt.

Inomhusluftens innehåll av vattenånga är en av de viktigaste förutsättningarna för bedömning av kondensationsrisk inne i en byggnadsdel eller på en yta. Trots detta är det osäkert vilken luftfuktighet man bör räkna med inomhus, dimensionerande fukttillskott i olika situationer.

I kommentaren till Svensk Byggnorm 1975:3 anges följande värden på fukttillskott inomhus för olika lokaler.

TABELL 4.1. Fukttillskott inomhus vintertid.

Lokal	Fukttillskott
Konstorshus	$2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$
Normalt boningsutrymme	$3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$
Våningsutrymme med särskilt stort fukttillskott eller liten luftväxling	$4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$

I en senare kommentar till SBN har dessa värden ökats. Fukttillskottet i normalt boningsutrymme anges numera till $4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. De flesta beräkningarna i rapporten har emellertid gjorts med fukttillskottet $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

Slagregnets inverkan på fukttinnehållet i byggnadsdelar behandlas i KAP 6.

De intressanta fukttransportmekanismerna är diffusion, fuktkonvektion

och kapillärsugning.

Diffusion av vattenånga i ett poröst material vid isoterma förhållanden beskrivs av ekvationen

$$g = - \delta \cdot \text{grad } v$$

$$g = \text{fuktflöde (kg/m}^2 \cdot \text{s)}$$

$$v = \text{ånghalt (kg/m}^3)$$

$$\delta = \text{materialets ånggenomsläpplighet (m}^2/\text{s)}$$

Fuktkonvektion innebär att luft som strömmar genom byggnadsdelen för med sig vattenånga. Kondensationsrisk kan finnas vintertid om övertryck råder inomhus.

Då fuktkonvektion och diffusion förekommer samtidigt påverkas utseendet hos ånghaltskurvan.

FIG 4.1 visar schematiskt förhållandena då konvektionen har samma respektive motsatt riktning som diffusionen.

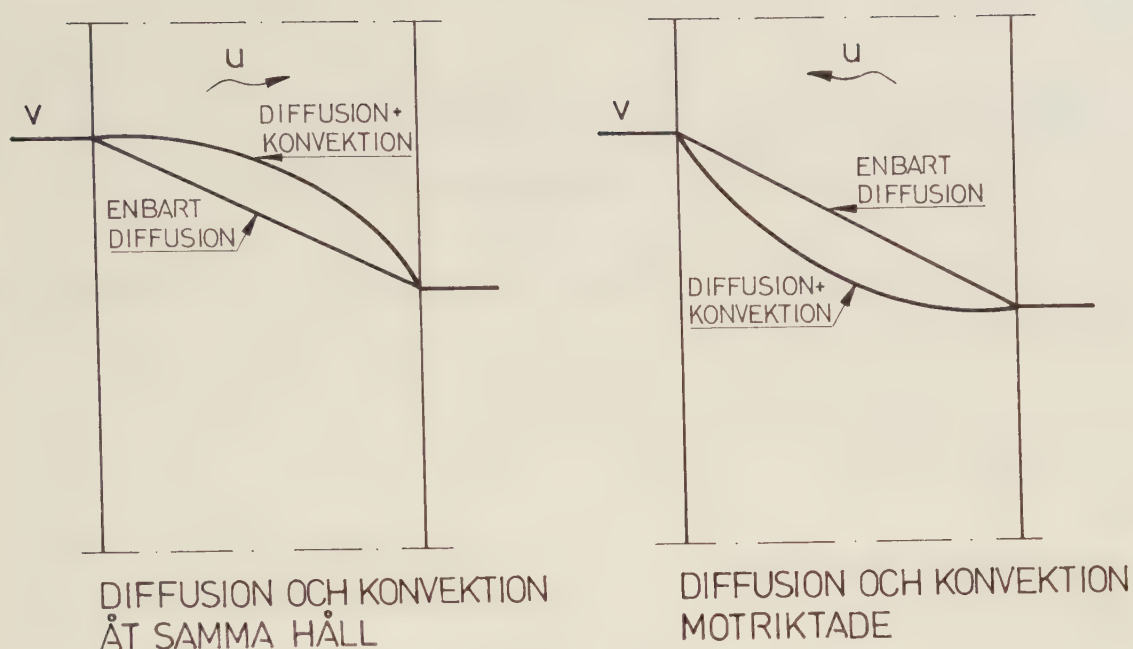


FIG 4.1. Vattenångkoncentration i ett material vid samtidig diffusion och konvektion. Se Sandberg (1971).

I material med låg luftgenomsläpplighet och utan sprickor eller andra otätheter dominerar diffusionen. I andra fall kan fuktkonvektion dominera. Vid tilläggsisolering av en byggnadsdel kommer denna med all säkerhet att bli mera lufttät på grund av nytillkomna skikt och längre strömningsvägar för luften. Fuktkonvektion bör därför få mindre inverkan än tidigare. I följande exempel beräknas möjliga kondenserade fuktmängder p g a diffusion respektive fuktkonvektion i en yttervägg med sprickor före och efter invändig tilläggsisolering.

EXEMPEL

Diffusion och fuktkonvektion betraktas i det här exemplet som oberoende av varandra.

En $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg betraktas under stationära förhållanden. Klimatförhållandena är: Ute: -20°C , 85% RF

Inne: $+20^{\circ}\text{C}$, fukttillskott $4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$

Invändigt övertryck 20 Pa

Otättheter i den oisolerade väggen antas kunna approximeras med 2 st 0,5 mm breda springor per $1 \times 1 \text{ m}^2$.

Väggen isoleras invändigt med 10 cm mineralull + en gipsskiva. Detta antas påverka otättheterna så att endast den ena springan kvarstår, med samma bredd men ökad längd i strömningsriktningen.

Vid laminär strömning kan Poiseulles lag användas för att beräkna strömningshastigheten

$$u = \frac{\Delta p \cdot b^2}{12 \cdot \eta \cdot l}$$

Δp = tryckskillnad (Pa)

b = spaltvidd (m)

η = luftens dynamiska viskositet (Ns/m^2)

l = spaltens längd mätt i luftströmmens riktning (m)

Den fuktmängd som maximalt kan kondensera är

$$g_{\text{kond}} = L (v_i - v_{\text{su}})$$

L = genomströmmad luftmängd ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

v_i, v_{su} = ånghalten inne och mättnadsånghalten ute (kg/m^3)

Med insatta värden

$$\text{Före isolering: } g_{\text{kond}} = 24,8 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$\text{Efter isolering: } g_{\text{kond}} = 9,7 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Kondensationsmängden p g a diffusion är före isolering ungefär lika med noll.

Isoleringen görs utan ångspärr. Följande materialdata används:

$$\lambda_{\text{tegel}} = 0,58 \text{ W/mK,}$$

$$\delta_{\text{tegel}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\lambda_{\text{mineralull}} = 0,04 \text{ W/mK,}$$

$$\delta_{\text{mineralull}} = 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$m_{\text{gipsskiva}} = 0,06 \text{ m}^2\text{K/W,}$$

$$z_{\text{gipsskiva}} = 3 \cdot 10^3 \text{ s/m}$$

Detta ger

$$g_{\text{kond}} = 28,9 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

I fortsättningen behandlas inte fuktkonvektion.

För praktiska beräkningar av fukttransport i vätskefas används ofta ekvationen

$$g = -k \cdot \text{grad } w$$

g = transporterad fuktmängd ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

k = kapillärledningskoefficienten (m^2/s)

w = fukthalt (kg/m^3)

Vid låga fukthalter är transporten i vätskefas mycket liten för många byggnadsmaterial. Den ökar kraftigt då fukthalten uppnår ett värde som brukar kallas den kritiska fukthalten, w_k , (se Vos (1967)). En förklaring till detta är att vattnet inte längre bildar ett sammanhängande nätverk i porerna, under denna fukthalt. Den kritiska fukthalten ligger för de flesta byggnadsmaterial mycket högt, betydligt över det område som omfattas av materialets sorptionskurva.

4.2 UTGÅNGSKONSTRUKTIONER

Fuktbalansen i en konstruktion påverkas av omgivande klimat, egenskaper hos ingående material, förekomsten av vatten- och ångtäta skikt och placeringen av värmeisolering. I detta avsnitt skall göras en principiell diskussion av hur olika sätt att tilläggsisolera kan påverka en befintlig konstruktions fuktbalans.

Det är naturligtvis praktiskt ogenomförbart och ganska ointressant att diskutera alla de konstruktioner som kan bli aktuella för tilläggsisolering. En kvalitativ diskussion kan emellertid göras om man delar in konstruktionerna med avseende på placering av befintliga ångtäta skikt. Olika sätt att tilläggsisolera dessa konstruktioner kan sedan schematiseras på liknande sätt.

I det följande görs en sådan kvalitativ diskussion av ånghalts- och temperaturförhållanden för olika principiella konstruktionsalternativ. Konstruktionerna antas påverkade enbart av luftfukt. Inverkan av fuktkapaciteten hos olika ingående material bortses från i denna genomgång. Den behandlas något i KAP 4.3.

Uttrycket "ångtätt skikt" som förekommer flitigt kan ha varierande betydelse. Här kommer att förutsättas att ett ångtätt skikt har så stort ånggenomgångsmotstånd, i förhållande till andra ingående materialskikt, att det kan betraktas som mycket stort. Detta är i allmänhet fallet för konventionella ångspärrar men det finns även andra skikt som i praktiken kan omfattas av denna definition.

Befintliga konstruktioner kan delas in i tre intressanta typer:

1. Konstruktion utan något ångtätt skikt vare sig ut- eller invändigt. Detta kan t ex vara en yttervägg utan ångspärr med ventilerad eller ånggenomsläpplig ytterbeklädnad.
2. Konstruktion med utvändigt ångtätt skikt, t ex ett plant oventilerat tak eller en utvändigt fuktisolerad källaryttervägg.
3. Konstruktion med invändigt ångtätt skikt. Detta kan vara vilken byggnadsdel som helst som är försedd med en avsiktlig eller oavsiktlig ångspärr. En oavsiktlig ångspärr kan vara målning med någon färg som har stort ånggenomgångsmotstånd.

Tilläggsisolering kan principiellt göras på ett antal mer eller mindre intressanta sätt. Förteckningen nedan är en indelning med avseende på isoleringens placering och i samband med denna eventuellt nytillkomna ångtäta skikt.

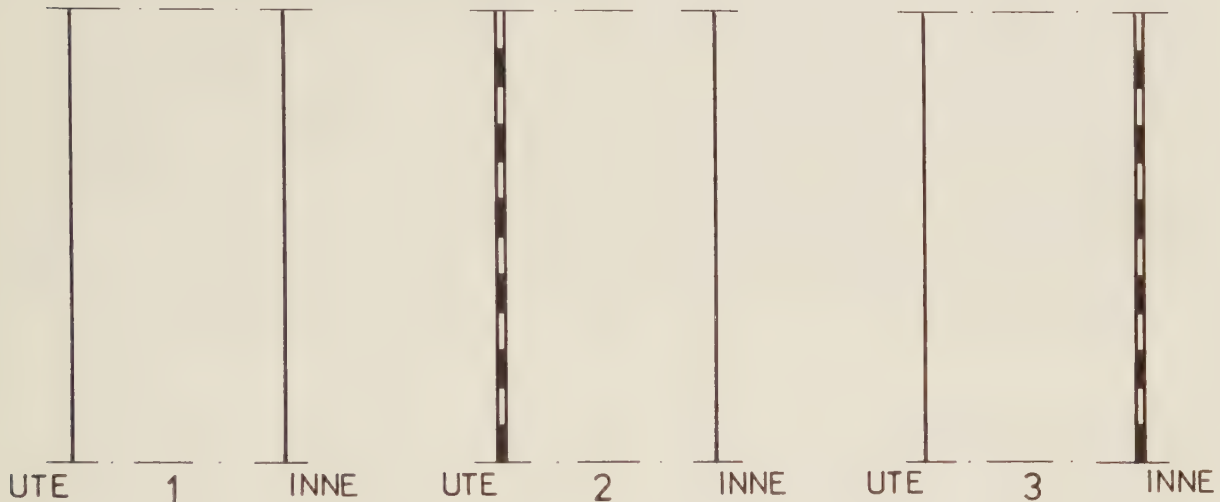
- A. Utvändig isolering utan nytt ångtätt skikt
- B. Utvändig isolering med nytt ångtätt skikt på utsidan
- C. Invändig isolering med nytt ångtätt skikt på insidan
- D. Invändig isolering utan nytt ångtätt skikt

Kombinationer mellan in- och utvändig isolering kan givetvis förekomma, men är säkert sällsynta. Inverkan på konstruktionens fuktbalans beror i sådana fall på relationen mellan isoleringstjocklekarna och kan innefat-

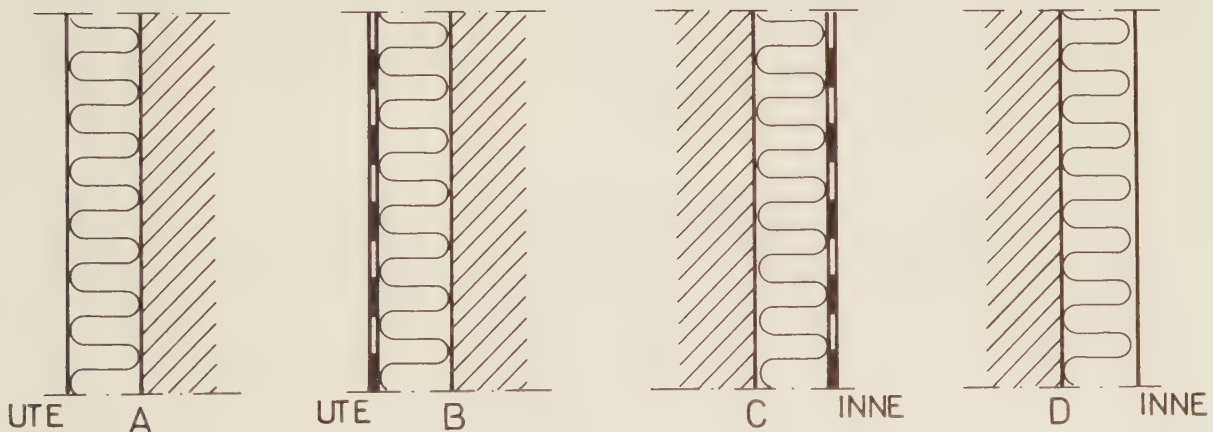
tas i resonemanget om enbart ut- eller invändig isolering beroende på vilken isolering som har störst värmemotstånd.

Isolering i hålrum, t ex kanalmurar, behandlas inte speciellt. Denna typ av isolering kan betraktas som utvändig isolering för inre delen och invändig isolering för yttre delen av konstruktionen. Isoleringsmaterialet förutsätts ha hög ånggenomsläpplighet om inget annat sägs.

BEFINTLIGA KONSTRUKTIONER



TILLÄGGSISOLERING



— ÅNGTÄTT SKIKT

FIG 4.2. Principiell indelning av befintliga byggnadsdelar och alternativ för tilläggsisolering för diskussion av fukttillstånd.

4.2.1 Tilläggsisolering av konstruktion utan befintliga ångtäta skikt (typ 1)

Denna konstruktion kan före tilläggsisolering ha en årsbalans med kondensation i den yttre delen under vintern. De mängder som kan kondensera är mycket små och kan torka ut under sommaren. På sommaren är luftens ånghalt hög vilket kan ge ökad fukthalt i väggen.

Om konstruktionen isoleras utvändigt stiger temperaturen och uttorkning kan ske. Med ett ångtätt skikt på utsidan av isoleringen, vilket kan förekomma t ex i ett tak, kan man under den kalla delen av året få kondensation mot detta. Förhållandena förbättras givetvis om solstrålning förekommer och om ingående material har stor fuktkapacitet. Kondenserade mängder är i allmänhet små och kan kanske accepteras om ingående material tål tillfälligt höjd fukthalt. Utvärdig tilläggsisolering med cellplast, som har stort ånggenomgångsmotstånd jämfört med mineralull, kan fungera på detta sätt. I detta fall inverkar dock temperaturhöjningen positivt.

Invändig tilläggsisolering med nytt ångtätt skikt på isoleringens varma sida medför teoretiskt inte några negativa konsekvenser av den typ som behandlas här. Fuktbalansen bestäms av uteklimatet, temperatur och ånghalt. Konstruktionen är emellertid känslig för arbetsutförandet på grund av de många anslutningar som måste göras. Dåligt utförande kan medföra att verkningssättet närmar sig fallet med isolering utan ångtätt skikt på insidan. Om lufttrycksförhållandena är sådana att fuktkonvektion inifrån och ut kan förekomma adderas diffusion och konvektion vintertid och kondenserade mängder kan bli stora.

Vid invändig tilläggsisolering utan nytt ångtätt skikt på varma sidan kommer konstruktionens fukthalt med säkerhet att öka. Ökningens storlek beror bl a på isoleringens tjocklek och omgivande klimat. I allmänhet kan eventuellt kondensat torka ut sommartid. Beständighetsproblem kan emellertid bli följden. Ett regelverk i kontakt med den fuktiga väggen kan angripas av röta och mögel.

4.2.2 Tilläggsisolering av konstruktion med befintligt ångtätt skikt på utsidan (typ 2)

I denna konstruktion kan man vintertid ha kondensation i väggens yttre delar, innanför det ångtäta skiktet. På sommaren, vid högre utetemperatur, torkar väggen ut inåt. I vissa fall kan man ha ständig kondensation i väggen, det vill säga att relativa fuktigheten alltid är 100% i en zon innanför tätskiktet. Detta behöver inte nödvändigtvis vara farligt för konstruktionen, om materialet tål fukt. Verknings sättet är välkänt för t ex källarytterväggar eller massiva betongtak.

Om konstruktionen isoleras utvändigt höjs dess temperatur, framför allt sommartid, och tidigare ansamlad fukt kan då torka ut inåt. Om den utvändiga isoleringen görs med nytt ångtätt skikt på utsidan kan man vid en stationär beräkning få relativa fuktigheten 100% i isoleringens yttre del. Man måste emellertid beakta de icke stationära förhållanden här. Den mängd vattenånga som kan transporteras in i konstruktionen är omvänt proportionell mot ånggenomgångsmotståndet. Det skulle ta mycket lång tid att uppnå den ånghaltsfördelning som visas i FIG 4.3.b. Felaktigheter i det gamla tätskiktet kan givetvis tillåta diffusion, men de mängder som kan transporteras in är säkert obetydliga. Allvarligare problem kan uppstå om det nya ångtäta skiktet är skadat så att läckage in i isoleringen kan förekomma. Detta kan vara aktuellt vid tak som tilläggsisoleras med ny isolering och papptäckning ovanpå en befintlig papptäckning. Vatten som kommer in utifrån måste torka ut genom diffusion, vilket kan ta mycket lång tid.

Invändig tilläggsisolering med ny invändig ångspärr medför givetvis att konstruktionen blir kallare, men vattenånga kan inte transporteras in i den om ångspärren fungerar på avsett sätt. Fuktinnehållet blir därmed i medeltal konstant, med eventuell omfördelning på grund av varierande temperaturförhållanden. I FIG 4.3.c är relativa fuktigheten i väggen 100%, men detta är, som i föregående fall, teoretiskt vid stationära förhållanden och uppnås inte förrän efter mycket lång tid förutsatt, givetvis, att det inte är konstruktionens begynnelsestillstånd.

Om konstruktionens ytteryta blir mycket starkt solbelyst eller av någon annan anledning uppvärmd kan det möjligen finnas risk för diffusion inåt och kondensation mot den nya ångspärren. Detta förutsätter ganska låg

innetemperatur samt att konstruktionen har liten värmekapacitet och högt fuktinnehåll.

Om isoleringen görs utan invändig ångspärr kan fukthalten öka betydligt, eftersom den sänkta temperaturen vintertid ökar kondensationsrisken och medför att större fuktmängder kan kondensera. Ett typiskt exempel är källarytterväggar, där man i allmänhet rekommenderar att isoleringen görs utan invändig ångspärr, för att fukt från eventuellt läckage i den utvändiga fuktspärren skall kunna torka ut inåt. Detta kan ge ökad kondensationsrisk i de delar av källarytterväggen som är i närheten av eller ovanför markytan.

I FIG 4.3 visas schematiskt temperatur- och ånghaltsförhållanden i konstruktionen vid stationära förhållanden vintertid. Vid kondensation är visade ånghaltskurvor orimliga, men de har behållits av tydlighetsskäl.

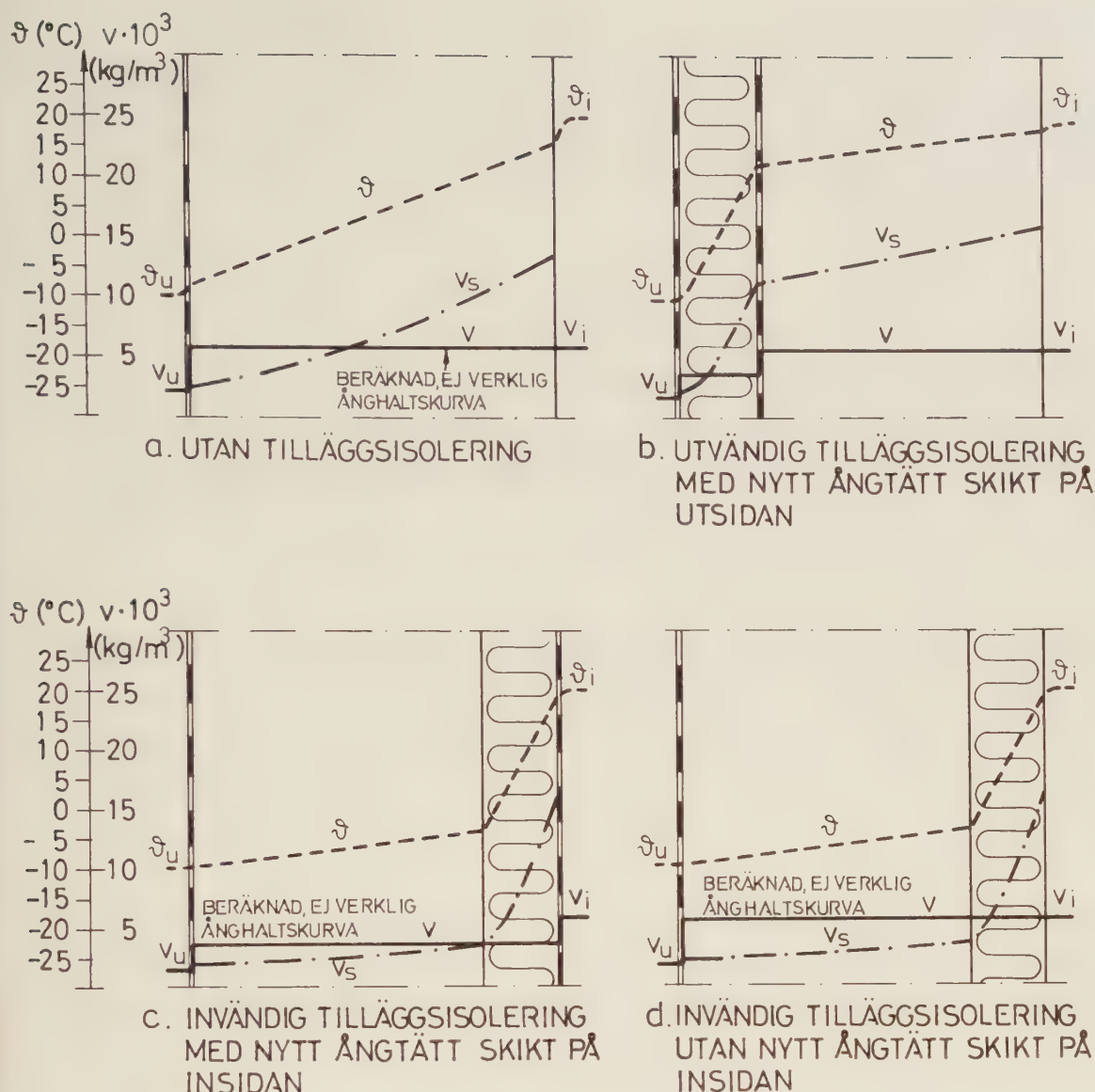


FIG 4.3. Schematiska temperatur- och ånghaltsförhållanden under stationära förhållanden vintertid i befintlig konstruktion med utvärdigt ångtätt skikt. Utan tilläggsisolering och med olika varianter av tilläggsisolering

4.2.3 Tilläggsisolering av konstruktion med befintligt ångtätt skikt på insidan (typ 3)

Om den invändiga ångspärren fungerar perfekt påverkas väggens fukttillstånd endast av uteluftens fukttinnehåll och temperaturförhållandena. Om ångspärren inte är perfekt utan har skarvar och hål kan fukt transporteras in i väggen genom diffusion och fuktkonvektion vid invändigt övertryck. Kondenserade mängder blir i allmänhet mycket små och fukten kan

torka ut utåt sommartid.

De flesta konstruktioner i nybebyggelse ser ut på detta sätt. Vid äldre konstruktioner kan det ångtäta skiktet på insidan vara avsiktligt eller oavsiktligt. Invändig målning med en relativt ångtät färg kan vara en oavsiktlig ångspärr.

Utvändig isolering utan nytt ångtätt skikt fungerar ur fuktsynpunkt enbart positivt. Om den utvändiga isoleringen görs med nytt ångtätt skikt måste man emellertid beakta risken för läckage. Ett annat farligt fall kan vara när konstruktionens fuktinnehåll är högt vid isoleringen, t ex genom ett kraftigt slagregn. Detta kan betraktas som ett slags byggfukt, som sedan inte kan torka ut vare sig inåt eller utåt.

Om invändig isolering med ny ångspärr görs, och denna fungerar på avsett sätt händer ingenting utom att den befintliga konstruktionens jämviktsfukthalt ökar något på grund av lägre temperatur vintertid. Torrt virke bör användas i regelverk så att inte "byggfukt" stängs in mellan de två ångtäta skikten.

Invändig isolering utan ångspärr medför kondensation mot den gamla ångspärren. Om isoleringens värmemotstånd är stort i förhållande till den gamla konstruktionens och invändig ånghalt är hög kan ganska stora fuktmängder kondensera. Detta kan ha obehagliga konsekvenser för träreglar och andra fuktkänsliga beståndsdelar i konstruktionen.

Som en sammanfattning av diskussionen kan sägas att risk för kondensation i sådan omfattning att fuktproblem kan uppstå finns vid invändig tilläggsisolering utan ny ångspärr. Speciellt stora fuktmängder kan kondensera om den befintliga konstruktionen innehåller något ångtätt skikt, antingen in- eller utvändigt.

Invändig tilläggsisolering är känslig för arbetsutförandet både på projekterings- och själva utförandestadiet. Vid projekteringen bör man se till att lösa t ex anslutningar till fönster så att kondens undviks och kontrollera om man kan ansluta nya elledningar till befintliga sådana utan kondensationsrisk. Vid det praktiska utförandet bör skarvning av ångspärren göras noggrant och springor vid anslutningar och genomföringar så små som möjligt.

Springor i ångspärren behöver inte vara allvarliga med avseende på fuktgenomgång. Vid små springor transporteras små fuktmängder in, och kan fördelas över stora ytor. Om det finns springor i den befintliga byggnadsdelen kan luftläckage ske genom isoleringsmaterialet, som ofta har god förmåga att släppa igenom luft.

4.3 INVERKAN AV MATERIALENS FUKTKAPACITET

Den i KAP 4.2 genomförda diskussionen har begränsad giltighet eftersom alla byggnadsmaterial är mer eller mindre hygroskopiska. Ju mera hygroskopiskt ett material är, desto längre tid tar det innan materialets fuktinnehåll kommer i jämvikt efter ändrade klimatförhållanden.

Som ett mått på hur hygroskopiskt ett material är, kan relativa fuktkapaciteten användas. Den definieras som sorptionskurvens lutning

$$\xi = \frac{dw}{d\phi} \quad (\text{kg/m}^3)$$

eller

$$\xi = \frac{du}{d\phi} \quad (\text{kg/kg})$$

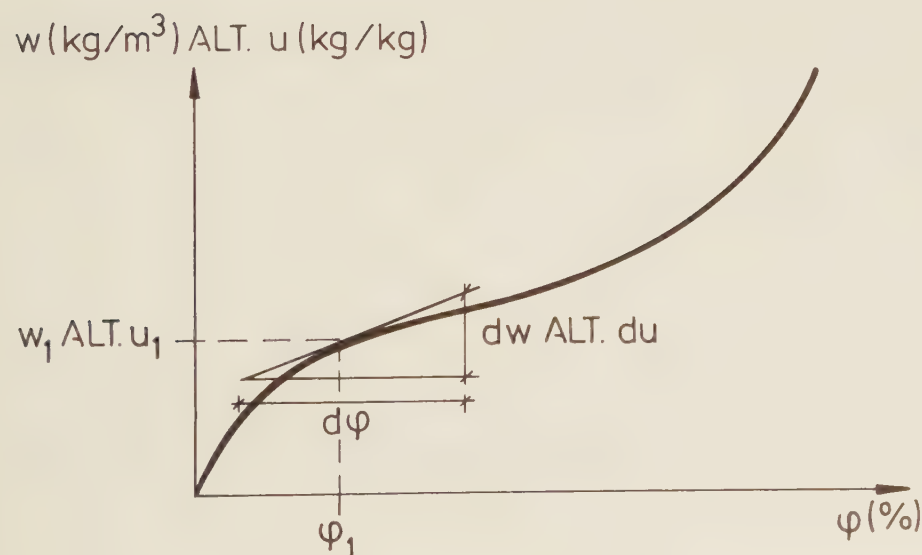


FIG 4.4. Relativa fuktkapaciteten för ett hygroskopiskt material, vid relativa fuktigheten ϕ_1 .

Några numeriska värden på ξ ges i TAB 4.2. Dessa är bestämda ur sorptionskurvor uppmätta av Ahlgren (1972). Då materialets densitet angivits av Ahlgren har båda definitionerna använts. I annat fall är ξ baserad endast på fuktkvoten.

TABELL 4.2. Relativa fuktkapaciteten för några byggnadsmaterial, beräknade från mätningar av Ahlgren (1972).

Material	$\xi = \frac{du}{d\phi} \text{ (kg/kg)}$			$\xi = \frac{dw}{d\phi} \text{ (kg/m}^3\text{)}$		
	$\phi = 25\%$	50%	75%	$\phi = 25\%$	50%	75%
Betong, K250 absorption	$12 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
Betong, K250 desorption	$45 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3}$	$30 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
Gasbetong, 510 kg/m ³ , absorption	$36 \cdot 10^{-3}$	$23 \cdot 10^{-3}$	$66 \cdot 10^{-3}$	18	12	34
Gasbetong, 510 kg/m ³ , desorption	$68 \cdot 10^{-3}$	$64 \cdot 10^{-3}$	$213 \cdot 10^{-3}$	35	33	109
Tegel, 1680 kg/m ³ , absorption	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	9	3	3
Glasull, 18 kg/m ³ , absorption	$20 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	0,4	0,2	0,2
Gips, 1240 kg/m ³ absorption	$6 \cdot 10^{-3}$	$14 \cdot 10^{-3}$	$47 \cdot 10^{-3}$	7	18	58
Furu, 510 kg/m ³ absorption	$140 \cdot 10^{-3}$	$140 \cdot 10^{-3}$	$243 \cdot 10^{-3}$	71	71	124
Porös träfiberskiva, 300 kg/m ³ , absorption	$126 \cdot 10^{-3}$	$137 \cdot 10^{-3}$	$249 \cdot 10^{-3}$	38	41	75

För några material, t ex gasbetong, ökar relativa fuktkapaciteten mycket markant vid relativa fuktigheter över 75%, vilket inte framgår av tabellen ovan.

Tilläggsisolering av en befintlig byggnadsdel kan ofta betraktas som en kombination mellan två material, det ena, isoleringen, med hög värmeiso-

leringsförmåga, hög ånggenomsläpplighet och nära ickehygroskopiskt, det andra med låg värmeisoleringsförmåga, låg ånggenomsläpplighet och hygroskopiskt. I en sådan materialkombination uppträder kondensation beräkningsmässigt vid gränsen mellan de två materialen. Fukttillståndets utveckling i en sådan konstruktion med hänsyn till materialens fuktkapacitet illustreras i FIG 4.5. Förutsättningarna är att fukttransporten sker som diffusion och kapillärsugning, samt att ingen transport i vätskefas sker då fukthalten är lägre än den kritiska, w_k .

Den befintliga konstruktionen, som alltså antas bestå av ett enda materialskikt, betecknas A, och tilläggsisoleringen B. Omgivande klimat antas under hela tiden oförändrat. Före tilläggsisoleringen (FIG 4.5.a) är förhållandena stationära. Kondensation äger inte rum och fukthaltsfördelningen bestäms av förhållandet mellan ånghalt och mätnadsånghalt enligt materialets sorptionskurva.

Den invändiga isoleringen medför att mätnadsånghalten sjunker så att det finns förutsättningar för kondensation omkring gränsen mellan de två materialen. I FIG 4.5.b har den maximala hygroskopiska fukthalten, w_{100} , uppnåtts i material A, vid skiktgränsen. Den streckade linjen visar den teoretiskt beräknade, men omöjliga ånghaltskurvan. Den verkliga ånghaltskurvan är lika med mätnadsånghalten i skiktgränsen.

Fukttinnehållet vid skiktgränsen ökar mer och mer. När den kritiska fukthalten uppnåtts kommer fukt att transporteras kapillärt i vätskeform både mot A och B. Den kritiska fukthalten är olika för A och B. I FIG 4.5.c visas en situation där jämviktsläget ännu inte är uppnått.

FIG 4.5.d visar ånghalts- och fukthaltskurvorna i det teoretiska jämviktsläget. Detta är uppnått då diffusionen in i och ut ur konstruktionen är lika stor. Detta betyder att ånghaltsgradienten $\frac{dv}{dz}$, där z är ånggenomgångsmotståndet, är lika stor i de båda materialens torra zoner. Ånghaltskurvan följer då den teoretiskt beräknade ånghaltsfördelningen fram till skärningspunkterna med mätnadskurvan.

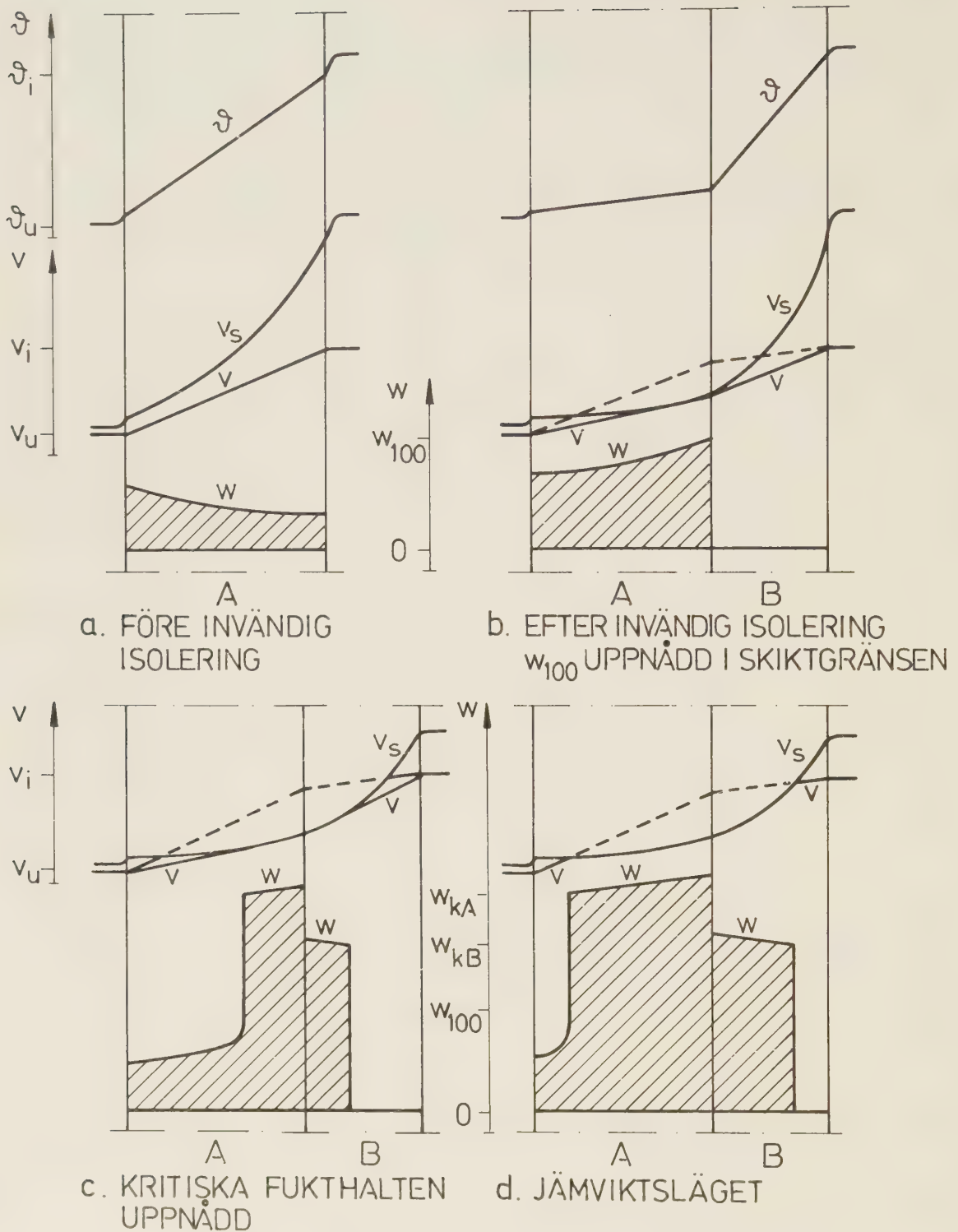


FIG 4.5. Kondensation i en konstruktion bestående av ett hygroskopiskt material (A) och ett icke hygroskopiskt material (B).

I praktiken tar det mycket lång tid innan jämviktsläget uppnås, storleksordningen månader och år, betydligt längre tid än man kan räkna med att ha stationära förhållanden. I de flesta klimat har kondensatet under någon del av året möjlighet att torka ut. Undantag är t ex frysrum.

Kvantitativa beräkningar av fukttillståndets utveckling vid kondensation har gjorts för tre olika väggtyper som isoleras invändigt utan invändig ångspärr. Den ena består av material med ganska låg fuktkapacitet, tegel, och de två andra består av starkt hygroskopiska material, gasbetong respektive trä. Stationära förhållanden förutsätts råda under lång tid, 6 månader.

I FIG 4.6 visas de schematiska sorptionskurvor som antagits för de tre materialen.

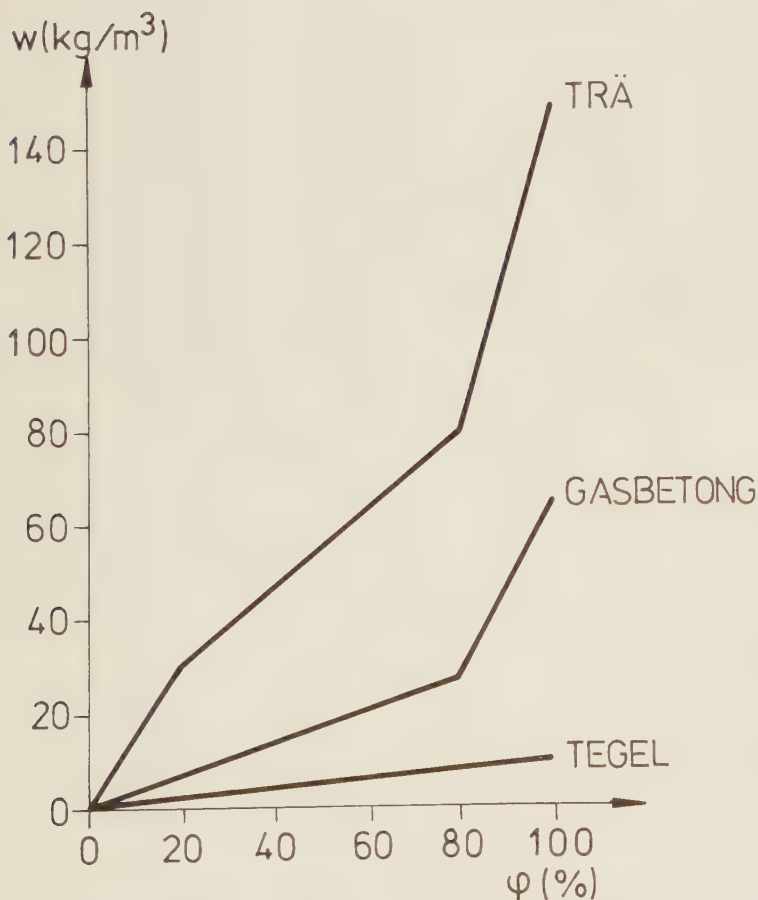


FIG 4.6. Schematiska sorptionskurvor för trä, gasbetong och tegel.

De tre väggarna har något olika värmemotstånd, men skillnaden är liten i förhållande till värmemotståndet hos tilläggsisoleringen, vilken antagits bestå av 10 cm mineralull, $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$. Isoleringsmaterialet med ytskikt har approximerats med ett värme- och fuktövergångsmotstånd på insidan av väggen. Detta innebär att tilläggsisoleringen antas sakna värme- och fuktkapacitet, vilket antas generellt i fortsättningen.

Beräkningen har gjorts numeriskt med framåtdifferensmetod. Fuktblödet har beskrivits med ekvationen

$$g = -\delta \cdot \text{grad } v - k \cdot \text{grad } w$$

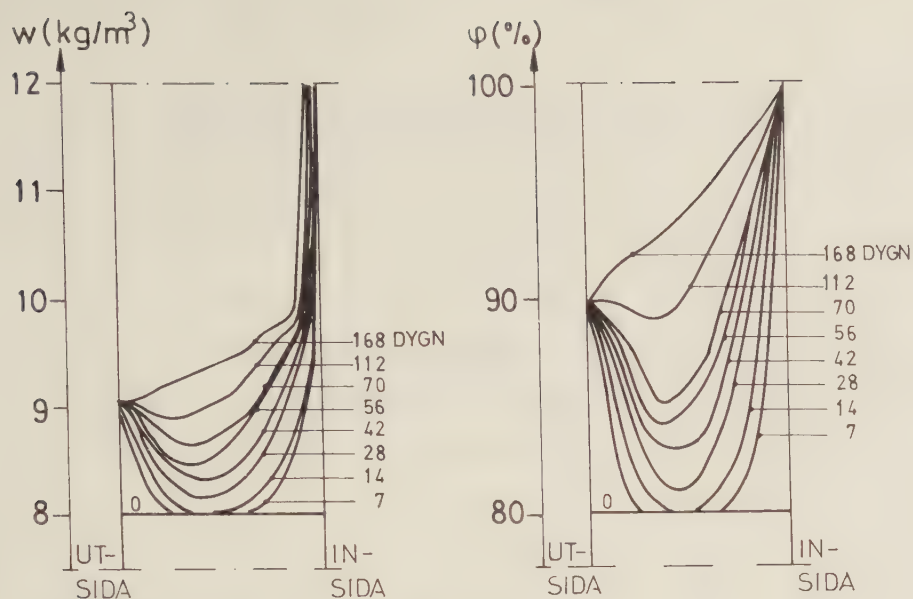
Vid temperaturer under 0°C har kapillärledningskoefficienten, k , satts till 0.

TABELL 4.3. Materialdata för beräkningen i FIG 4.7.

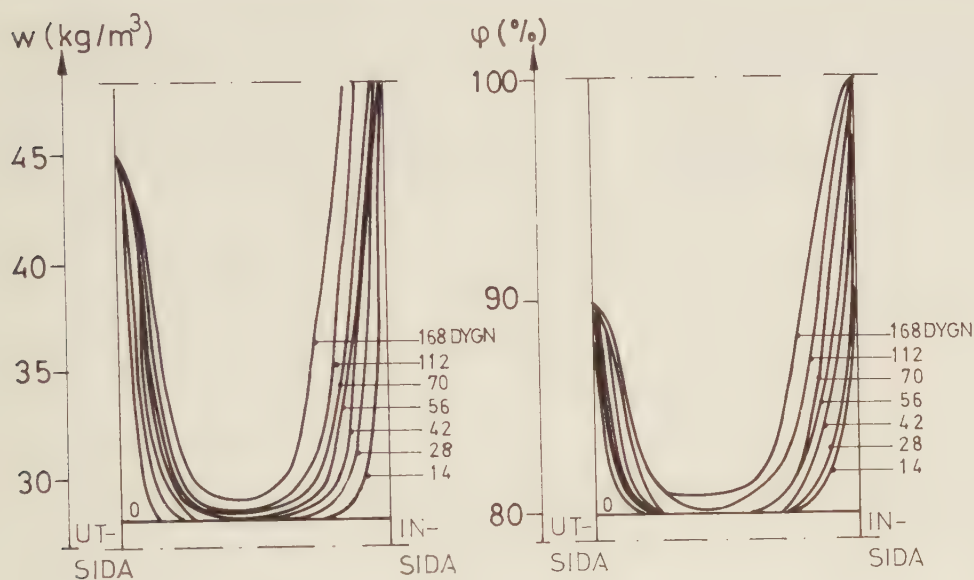
Material	Tjocklek	λ (W/mK)	δ (m^2/s)	k (m^2/s)
Tegel	0,38	0,60	$5 \cdot 10^{-6}$	$0,001 \cdot 10^{-6}$, $w < 90$ $0,01 \cdot 10^{-6}$, $w \geq 90$
Gasbetong	0,25	0,22	$(2 + 0,00055w^2) \cdot 10^{-6}$, $w < 100$ $7,5 \cdot 10^{-6}$, $w \geq 100$	$0,0002 \cdot 10^{-6}$, $w \leq 150$ $(-0,1275 + 0,00085 \cdot w) \cdot 10^{-6}$, $150 < w < 170$ $0,017 \cdot 10^{-6}$, $w \geq 170$
Trä	0,15	0,14	$0,15 \cdot 10^{-6}$	0 , $w < 150$ $0,00014 \cdot 10^{-6}$, $w \geq 150$

Inneklimatet är $+20^\circ\text{C}$, fukttillskott $4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ och uteklimatet är -10°C , 90% RF. I FIG 4.15 visas utvecklingen av fukthalt och relativ fuktighet i de tre väggarna. Som utgångstillstånd har antagits 80% RF i alla väggarna.

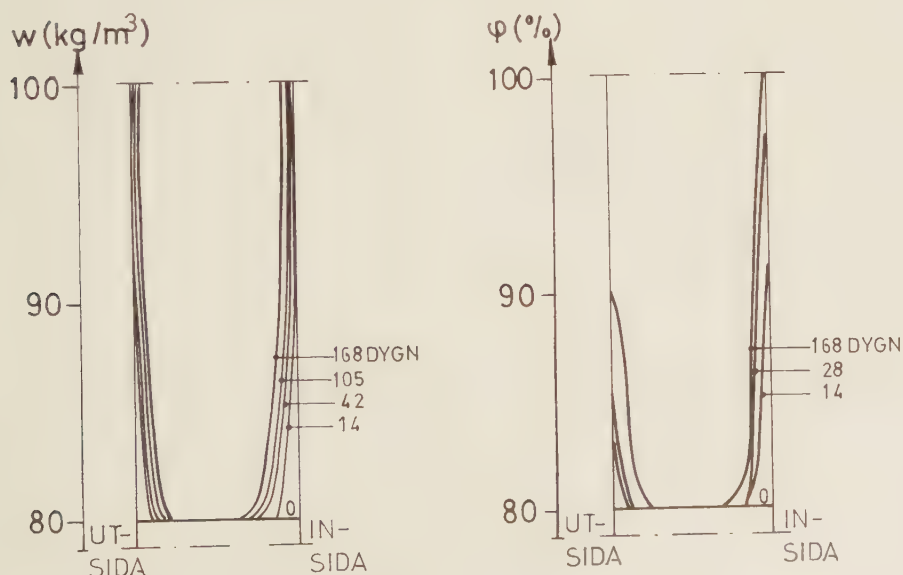
Vid det antagna klimatet och med kraftig invändig isolering kommer temperaturen att bli lägre än noll i alla väggarna. Kondensatet kommer då att avsättas som is. Ingen kapillär transport kan då äga rum, det vill säga transporten in i väggen är enbart diffusion.



1 1/2 - STENS TEGELMURVERK



250 mm GASBETONGMURVERK



150 mm MASSIVT TRÄ

FIG 4.7. Kondensation i 1 1/2-stens tegelvägg, 250 mm gasbetongvägg och 150 mm trävägg vid invändig isolering med 10 cm mineralull utan ångspärr.

För tegelväggen börjar kondensation praktiskt taget omedelbart. In i väggen går fukttransporten långsamt, relativa fuktigheten har inte stigit till 90% mitt i väggen förrän efter ca 16 veckor. Om temperaturen steg, skulle kondensatet givetvis sugas in i väggen.

För gasbetongväggen och träväggen uppträder egentlig kondensation inte förrän efter ca 3 - 4 veckor. I träväggen förekommer praktiskt taget ingen transport in i väggen. I gasbetongväggen går transporten långsamt, men skillnaden mellan ånggenomsläppligheten för trä och gasbetong är ganska stor, ca 20 ggr, vilket märks i den del av gasbetongen som är närmast kondensationssnittet. Mitt i gasbetongväggen är relativa fuktigheten dock inte mer än 81% ännu efter 24 veckor.

För de kraftigt hygroskopiska materialen kommer egentlig kondensation kanske inte att inträffa under en vinter. Man måste, för bedömning av risken för fuktskador i sådana fall, ta hänsyn till årsbalansen.

4.4 INVERKAN AV TILLÄGGSISOLERING PÅ BYGGNADSDELAR I NATURLIGT KLIMAT

4.4.1 Allmänt

För att realistiskt kunna bedöma inverkan av tilläggsisolering på byggnadsdelar har det ansetts intressant att göra datorberäkningar för konstruktioner med simulering av naturliga klimatförhållanden och beräkning av den icke stationära fukttransporten.

Ett datorprogram, där detta görs, har utvecklats av Sandberg (se Sandberg (1970) och (1973)). Beräkning av temperatur- och fuktvariationer i endimensionella konstruktioner görs numeriskt. Fukttransporten sker genom diffusion och kapillärsugning. Omgivande klimat, t ex utetemperatur, uteråghalt och solstrålning varierar kontinuerligt med tiden.

De icke stationära beräkningar som redovisas i det följande har gjorts med detta program. För beskrivning av använda förutsättningar och randvillkor hänvisas till Sandbergs rapporter.

4.4.2 Yttervägg av 1½-stens tegel

I detta avsnitt redovisas några icke stationära beräkningar av fuktförhållandena i ytterväggar av 1½-stens tegel. De materialegenskaper som valts för huvuddelen av beräkningarna är:

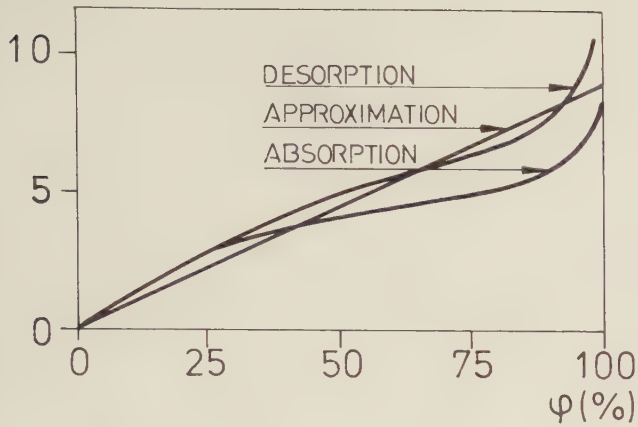
Värmeledningstal, λ	$= 0,6 \cdot (1 + 0,008 w)$	(W/mK)
Värmekapacitet, $\gamma \cdot c_p$	$= 1260 \cdot 10^3 + 4,2 \cdot w \cdot 10^3$	(J/m ³ K)
Anggenomsläpplighet, δ	$= 5 \cdot 10^{-6}$	(m ² /s)
Kapillärledningstal, k	$= 0,001 \cdot 10^{-6} \quad w < 90$	(m ² /s)
	$0,01 \cdot 10^{-6} \quad w > 90$	(m ² /s)
Sorptionskurva, ϕ	$= 0,1 \cdot w \quad w > 10$	
	$1 \quad w \leq 10$	

Inverkan av sorptionskurvans utseende har studerats för ett fall med uppfuktning och kondensation från torrt tillstånd ($w = 0$). FIG 4.8 visar sorptionskurvor för tre tegelsorter, uppmätta av Ahlgren (1972), med rätlinjiga approximationer inlagda. FIG 4.9 visar fukthalten vid olika tidpunkter efter uppfuktningens början, med sorptionskurvor enligt de olika approximationerna. Randvillkoren har satts så att det blir kondensation

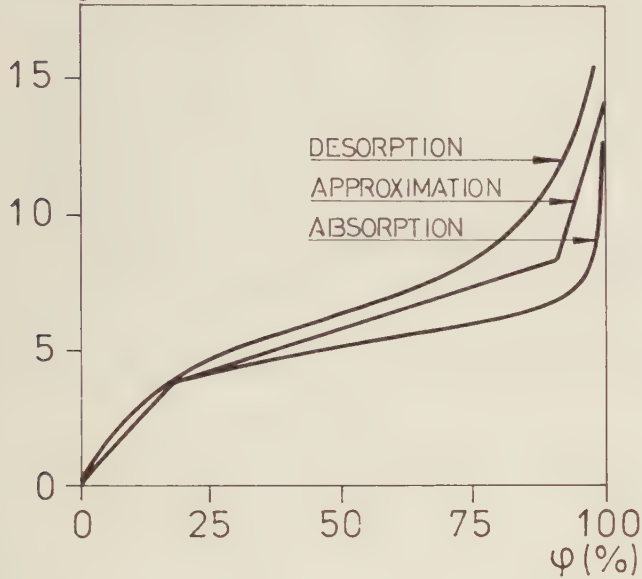
i väggen, 10 cm invändig mineralull, enligt tidigare, +20 °C och fukt-tillskottet $4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ inne samt -10 °C, 90% RF ute.

Av beräkningen framgår att de olika använda approximationerna medför skillnader i beräknade fukthaltsfördelningar som är så små att de i det här sammanhanget kan anses betydelselösa. Fuktkapaciteten är i alla tre fallen mycket låg jämfört med de flesta andra byggnadsmaterial.

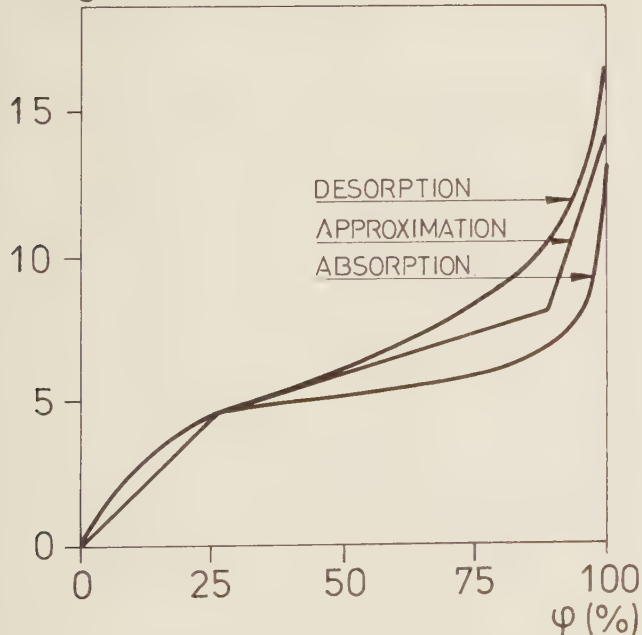
I de i fortsättningen redovisade beräkningarna har endast approximation I använts.

$w(\text{kg}/\text{m}^3)$ 

$\rho = 2030 \text{ kg}/\text{m}^3$,
 ÖPPEN POROSITET 14%
 APPROXIMATION I
 $w > 10, \varphi = 1.0$
 $w \leq 10, \varphi = 0.1 w$

 $w(\text{kg}/\text{m}^3)$ 

$\rho = 1860 \text{ kg}/\text{m}^3$,
 ÖPPEN POROSITET 31%
 APPROXIMATION II
 $w > 14, \varphi = 1.0$
 $7.5 < w \leq 14, \varphi = 0.83 + 0.012 w$
 $3.75 < w \leq 7.5, \varphi = -0.575 + 0.20 w$
 $w > 3.75, \varphi = 0.048 w$

 $w(\text{kg}/\text{m}^3)$ 

$\rho = 1890 \text{ kg}/\text{m}^3$,
 ÖPPEN POROSITET 31%
 APPROXIMATION III
 $w > 15, \varphi = 1.0$
 $8 < w \leq 15, \varphi = 0.76 + 0.016 w$
 $4.5 < w \leq 8, \varphi = -0.57 + 0.182 w$
 $w \leq 4.5, \varphi = 0.056 w$

FIG 4.8. Sorptionskurvor för tre tegelsorter, uppmätta av Ahlgren(1972) med linjära approximationer inlagda.

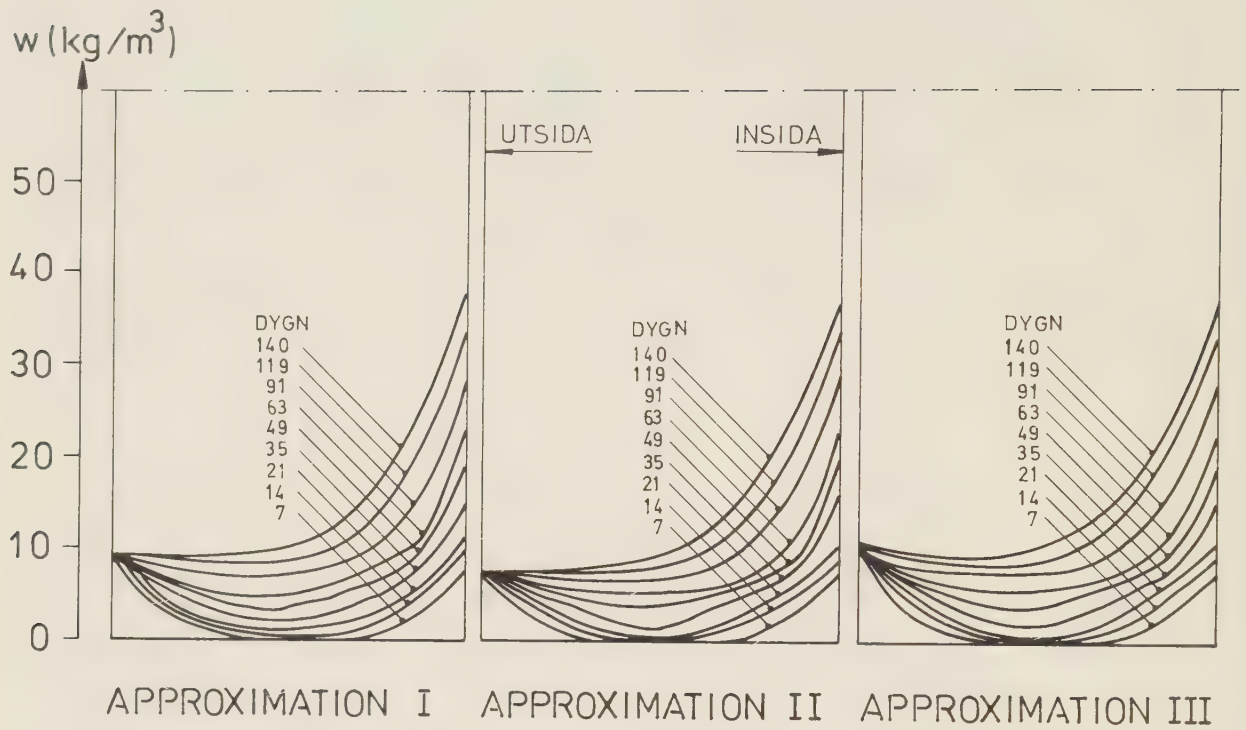


FIG 4.9. Fukthaltens utveckling i 1 1/2-stens tegelvägg vid uppfuktning och kondensation. Sorptionskurvor enligt FIG 4.8. Invändig isolering med 10 cm mineralull utan ångspärr.

I FIG 4.10 visas beräkningar av medelfukthaltens variation under fyra år i en vägg, randvillkor gällande för Lund, utan tilläggsisolering och med ett par olika alternativ för invändig isolering med värmemotståndet $2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$. Vid beräkning av det inre fuktövergångsmotståndet har isoleringsmaterialets ånggenomsläpplighet satts till $17,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ och ånggenomgångsmotståndet för en invändig gipsskiva till $3 \cdot 10^3 \text{ s/m}$. Detta gäller generellt för alla beräkningar där isoleringsmaterialet anges vara mineralull. Då isoleringsmaterialet anges vara cellplast har ånggenomsläppligheten satts till $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Beräkningarna i FIG 4.10 har gjorts utan solstrålning mot väggen. Detta är det farligaste fallet och kan förekomma i verkligheten då fasaden skuggas av andra byggnader m m. Inomhusklimatet har satts till $+20^\circ\text{C}$, fukt-tillskott $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ under hela året.

Då tegelväggen är oisolerad är medelfukthalten högst under sommaren och lägst under vintern. Detta är normalt för en konstruktion utan byggfukt och utan kondensation och beror på att luftens ånghalt är högst under sommaren och lägst under vintern. Vid invändig tilläggsisolering med 10 cm mineralull blir svängningarna i väggen motriktade, dvs högst fukthalt på vintern och lägst på sommaren. Under hösten och vintern kondenserar vattenånga i väggen. Fukthaltens maximum och minimum är samma under alla åren vilket innebär att all fukt som kondenserar under vintern kan torka ut under sommaren.

Då isoleringen görs med ny invändig ångspärr, som i beräkningarna antagits ha mycket stort ånggenomgångsmotstånd, kommer väggens fukttinnehåll att påverkas endast av uteluftens relativa fuktighet samt givetvis temperaturförhållandena. Variationerna blir mycket små. Den oisolerade väggen torkar på vintern ut något inåt. Denna möjlighet saknas för väggen med invändig ångspärr, som dessutom har lägre temperatur än tidigare och därför under större delen av året har något högre fukthalt än den oisolerade väggen. Då isoleringen görs med 10 cm cellplast blir medelfukthaltens variation i stort sett samma som i fallet med ångspärr. Någon diffusion in i väggen kan dock förekomma, varför fukthalten blir något högre än då det inre fuktövergångsmotståndet antas nära oändligt stort.

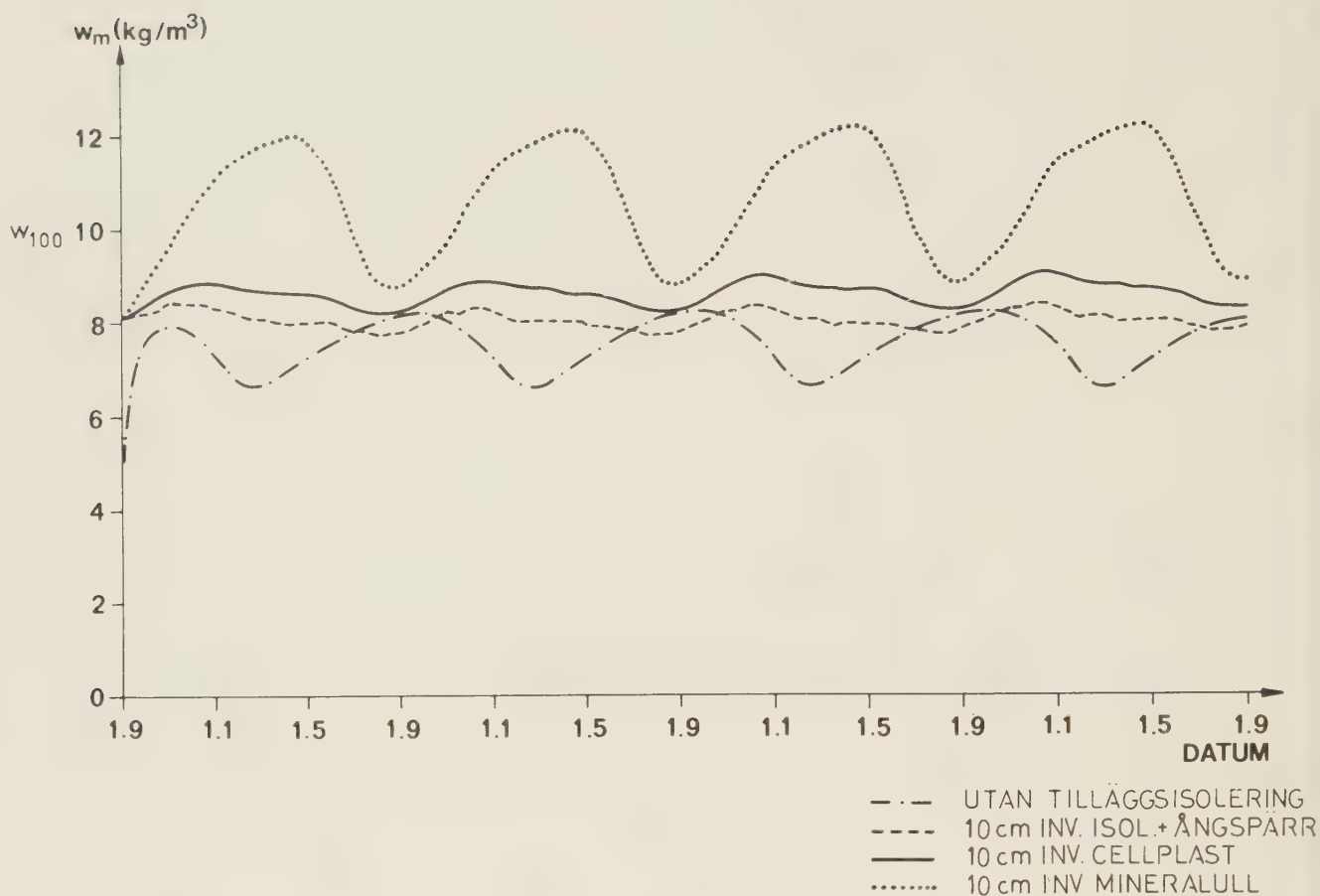


FIG 4.10. Medelfukthaltens variation i $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg, Lund, med och utan invändig tilläggsisolering. Utan strålning. Fukttillskott inomhus $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

För bedömning av risken för fuktskador kan fukthaltens fördelning i konstruktionen vara mera intressant än medelfukthalten. Denna visas i FIG 4.11, för samma fall som i FIG 4.10, vid fyra tidpunkter under året. Väggens utsida är vänd åt vänster. w_{100} betecknar den fukthalt som motsvarar relativa fuktigheten 100% för teglet. I datorprogrammet skrivs beräknade värden ut kl 24 på dygnet. Då är relativa fuktigheten i närheten av 100%. Detta är anledningen till de höga fukthalterna vid väggens utsida.

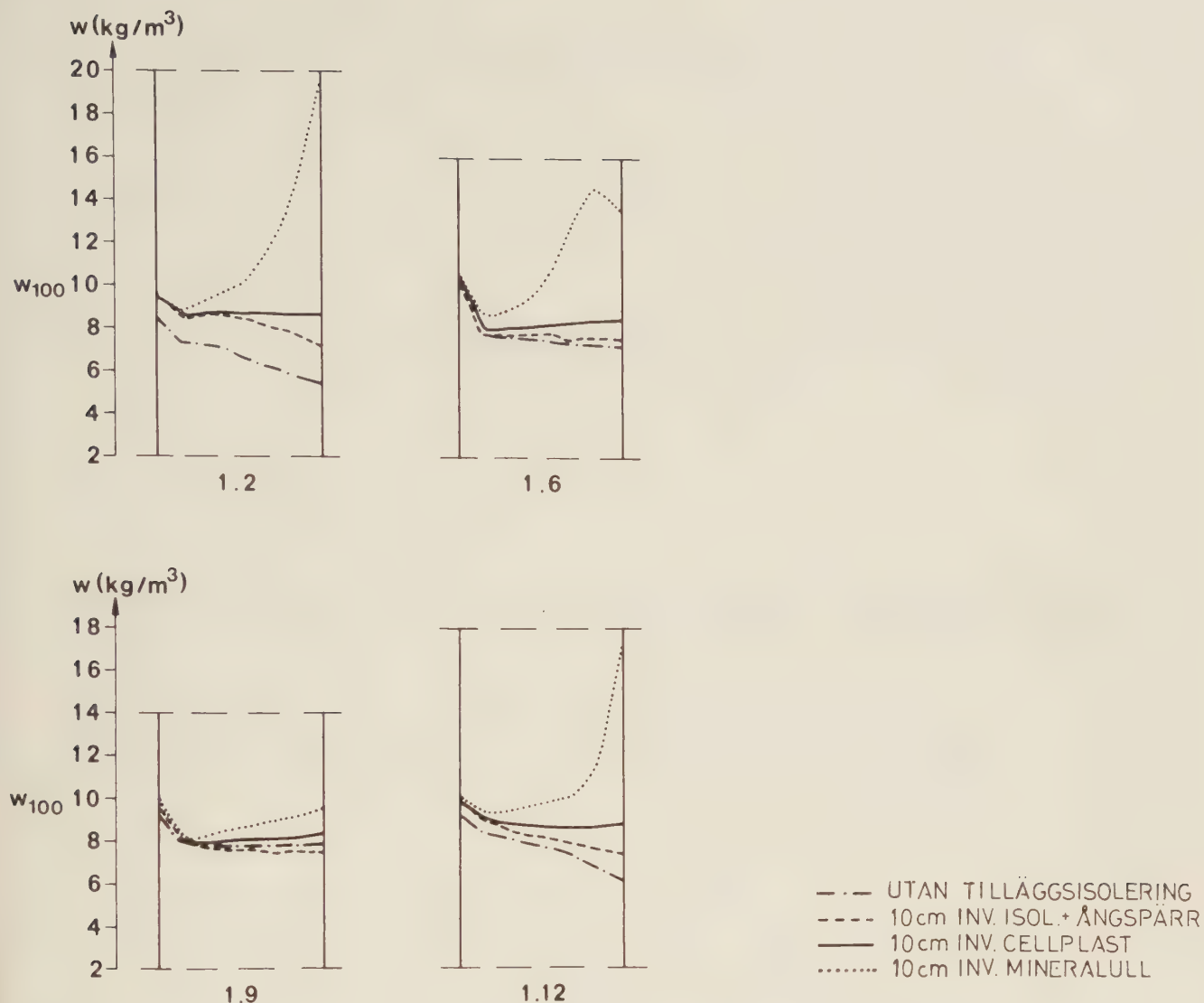


FIG 4.11. Fukthaltsfördelningen i 1½-stens tegelvägg, Lund, utan strålning, med och utan invändig tilläggsisolering. Samma fall som i FIG 4.10.

FIG 4.12 visar inflytandet av solstrålning mot väggen. Väggytans absorption för strålning har satts till 0,7. Liksom tidigare är klimatet Lund och väggen är invändigt isolerad med 10 cm mineralull utan ångspärr. I söderväggen förekommer knappast någon kondensation.

FIG 4.13 och 4.14 visar inverkan av invändig isolertjocklek respektive fukttillskottet inomhus. I båda fallen är väggen utan strålning, läge Lund. I fallet 15 cm invändig isolering utan ångspärr är fuktbalansen svagt negativ, då all kondenserad fukt inte hinner torka ut under sommaren. Det invändiga fukttillskottets inverkan är mycket stor. Observera att skalan i FIG 4.14 ändrats i förhållande till de tidigare fallen.

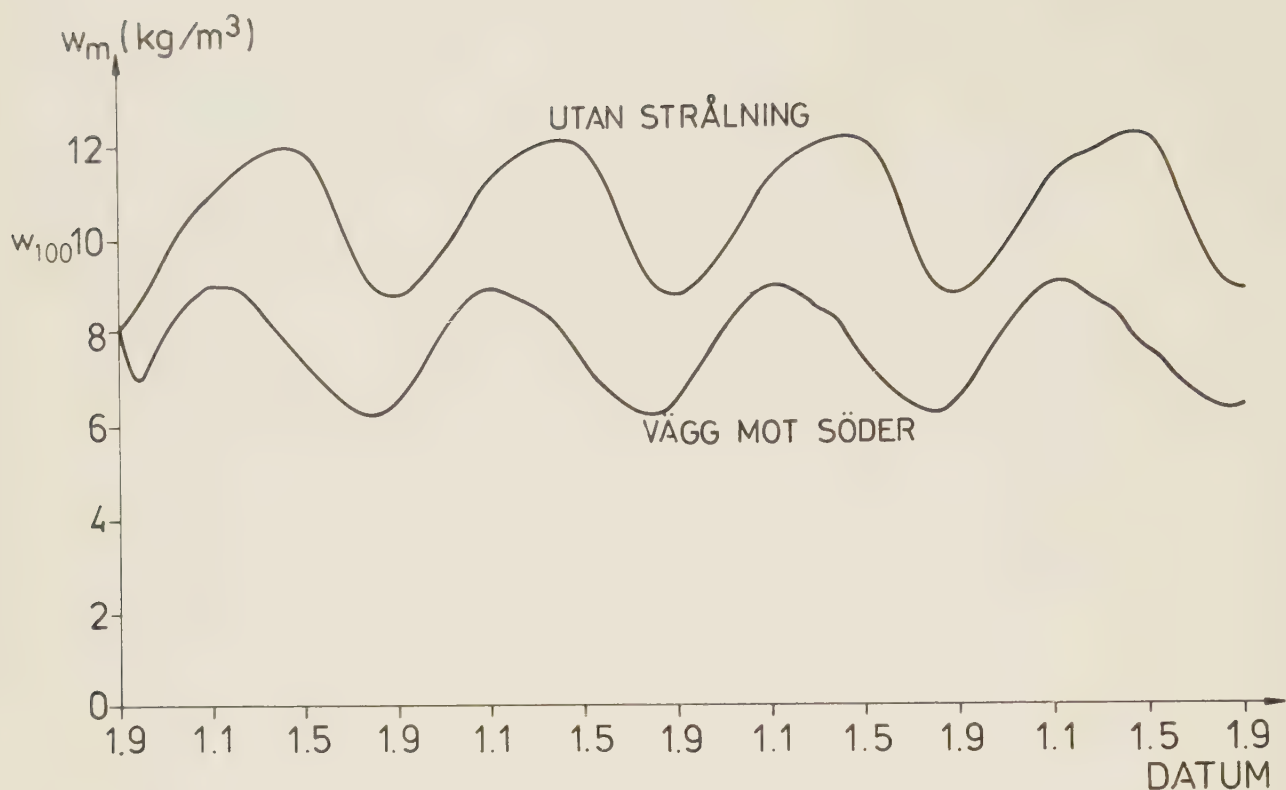


FIG 4.12. Inverkan av strålning på fuktbalansen för 1 1/2-stens tegelvägg, Lund, invändigt isolerad med 10 cm mineralull utan ångspärr. Fukttillskott inomhus $3 \cdot 10^{-3}$ kg/m³.

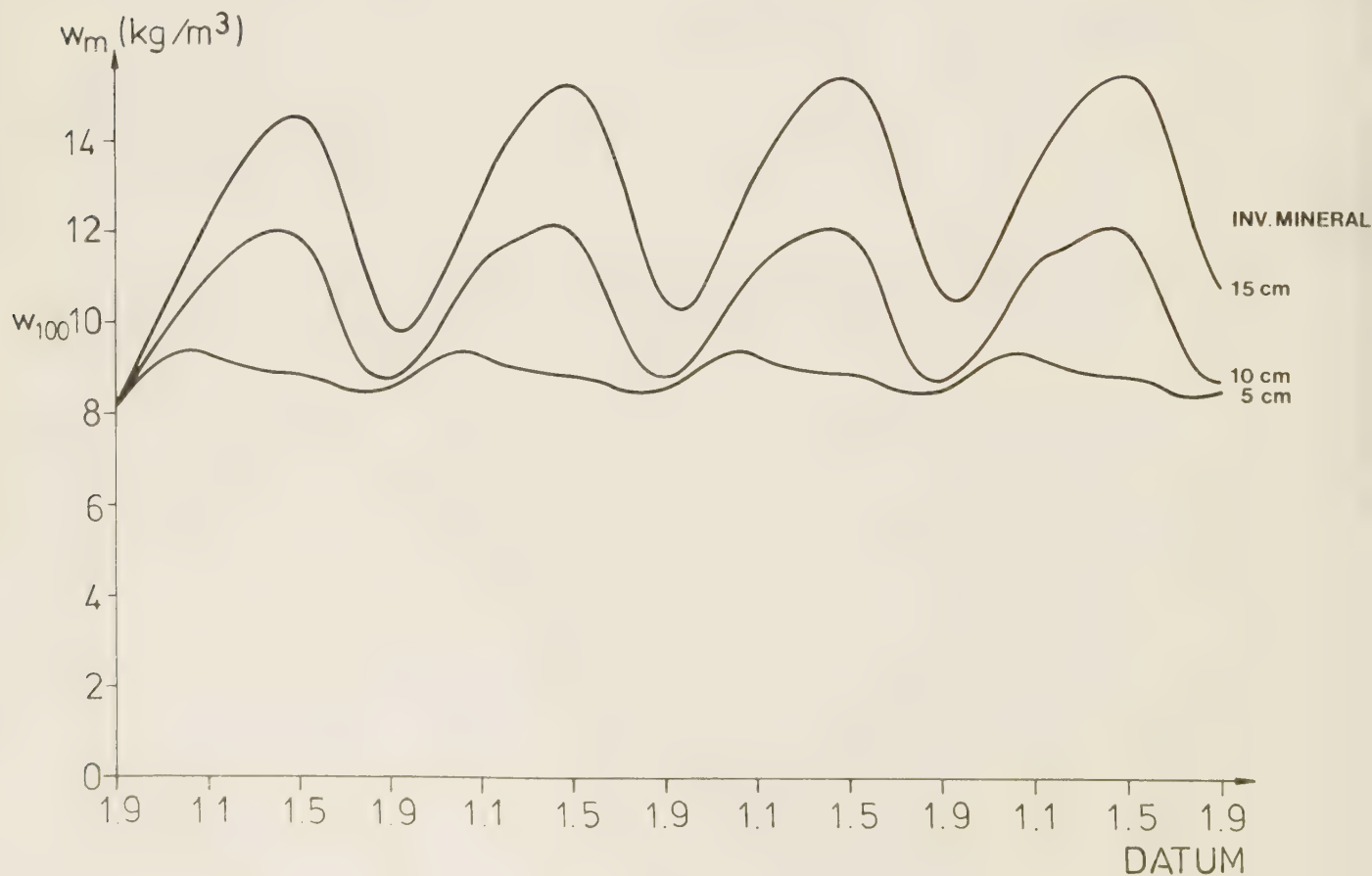


FIG 4.13. Inverkan av isolertjocklek vid invändig tilläggsisolering av 1 1/2-stens tegelvägg, Lund. Ingen ångspärr. Fukttillskott inne $3 \cdot 10^{-3}$ kg/m³.

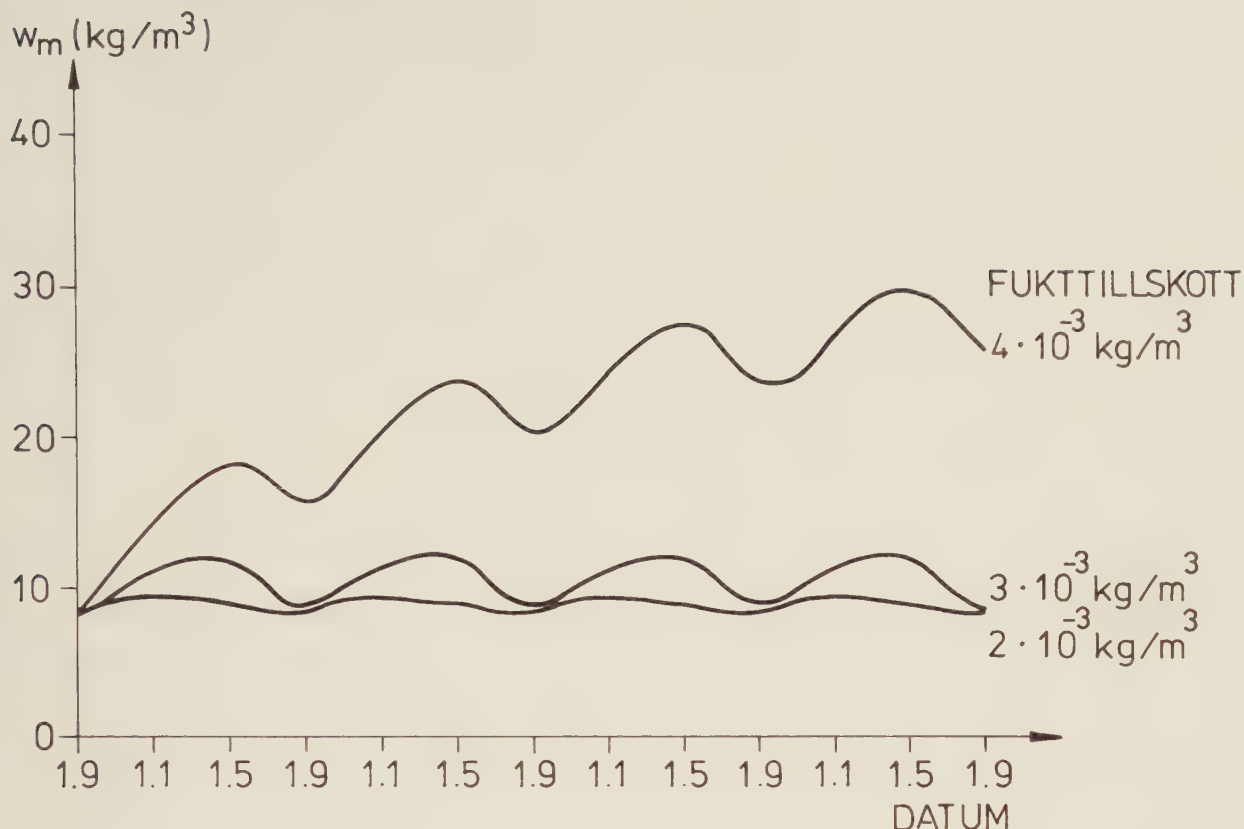


FIG 4.14. Inverkan av invändigt fukttillskott på fukttinnehållet i $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg, invändigt isolerad med 10 cm mineralull utan ångspärr. Lund.

Förhållandena i ett annat klimat, Luleå, har också studerats. Detta är ett betydligt kallare, men torrare klimat. I FIG 4.15 visas medelfukthalstens variation under fyra år, utan invändig isolering och med 10 cm invändig mineralull med respektive utan ny ångspärr. Inomhusklimatet har satts till 20°C , fukttillskott $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

För den oisolerade väggen ligger medelfukthalten lägre än i Lund, vilket beror på den lägre ånghalten inomhus. Vid invändig isolering av väggen fås mycket kraftig kondensation under vintern. FIG 4.16 visar fukthaltsfördelningen i väggen vid fyra olika tidpunkter under året.

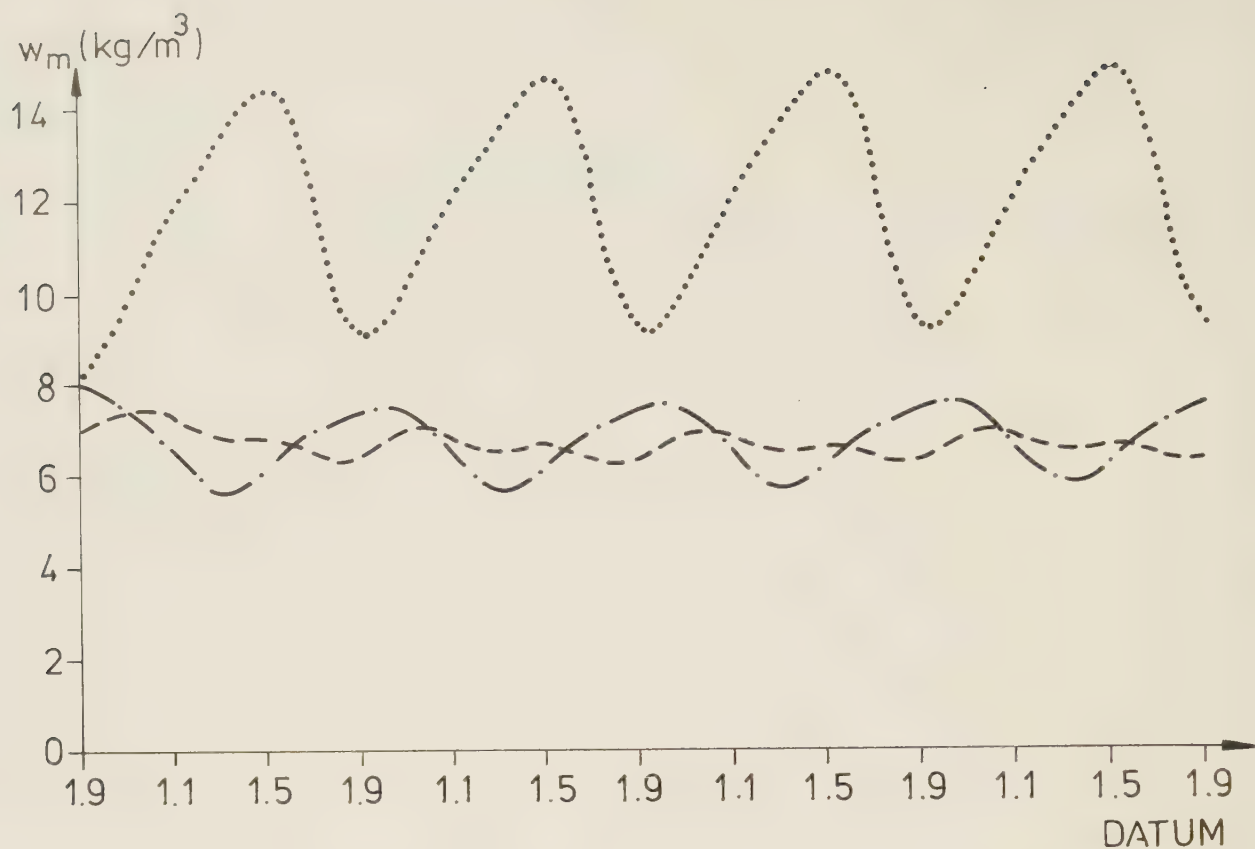


FIG 4.15. Medelfukthaltens variation i 1 1/2-stens tegelvägg, Luleå, utan strålning, med och utan invändig tilläggsisolering. $FT = 3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

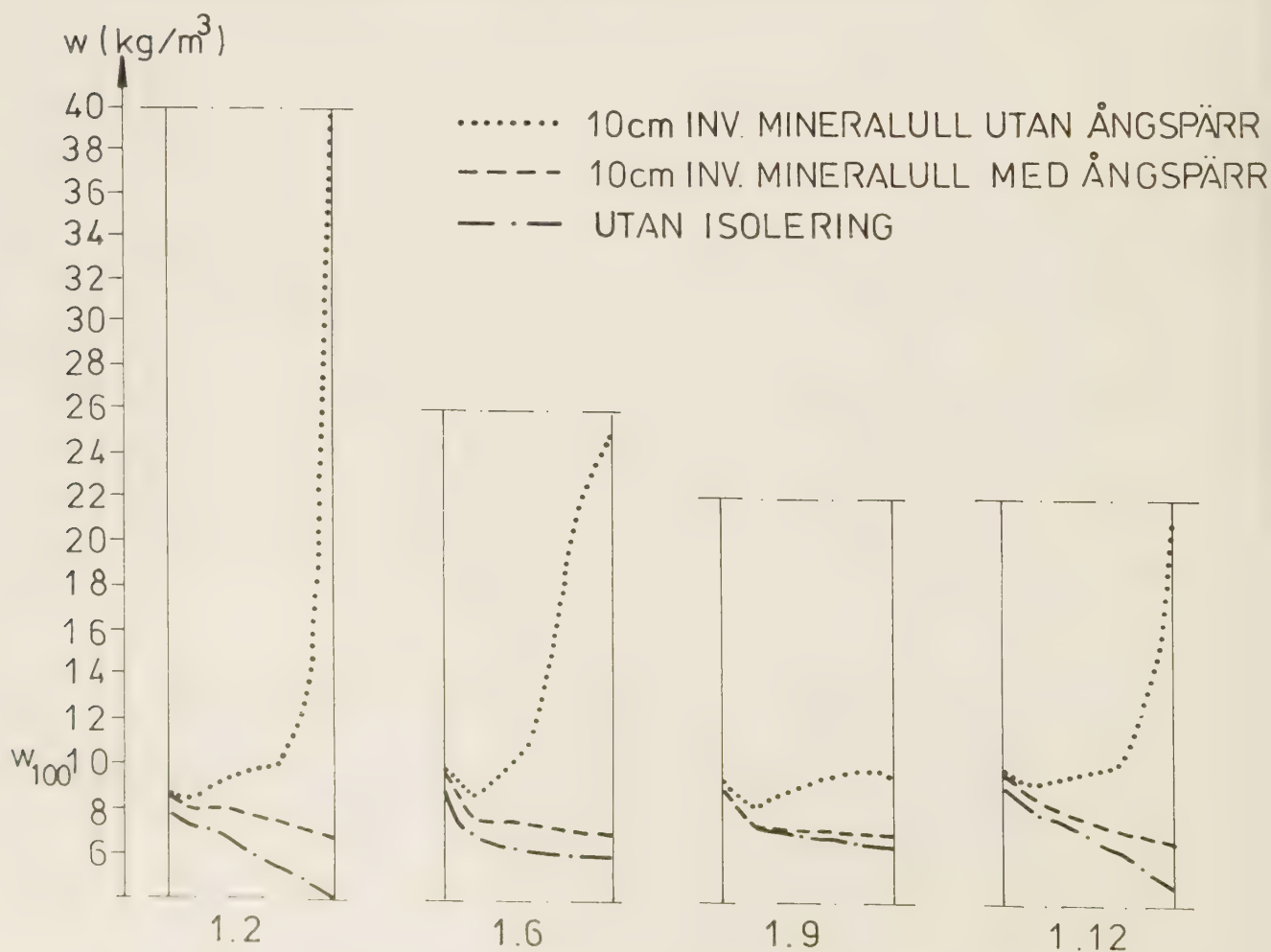


FIG 4.16. Fukthaltsfördelning i 1 1/2-stens tegelvägg, som i FIG 4.15.

För de olika fallen har en kondensationsperiod beräknats genom att titta på fukthalten i det innersta tegelskiktet, mot isoleringen. Kondensationsperioden har definierats som den tid under vilken fukthalten i detta skikt ökar. I FIG 4.17 och TAB 4.4 visas detta för de fall som är aktuella.

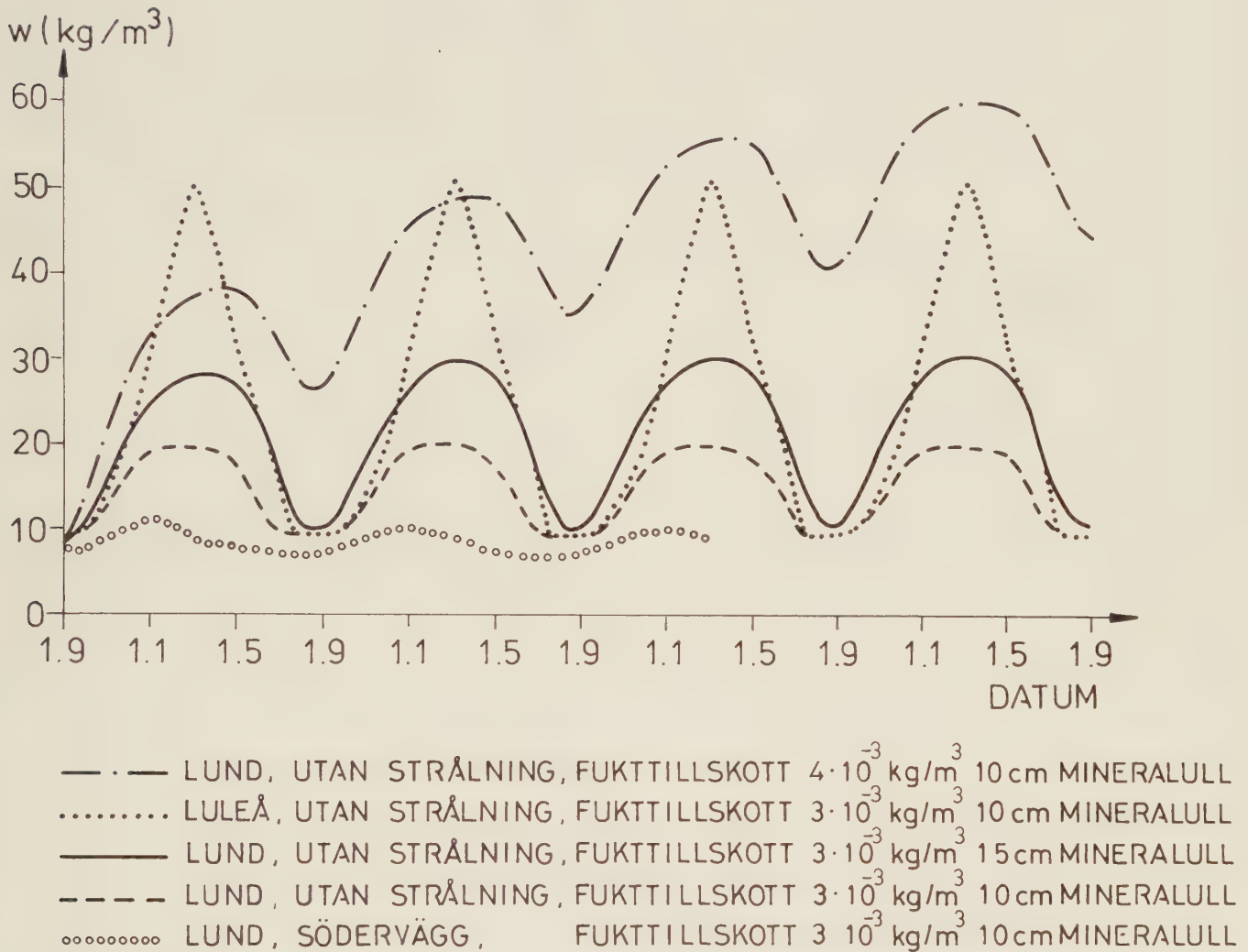


FIG 4.17. Fukthalt i gränsskiktet mellan tegel och isolering för olika beräknade fall på $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg. Alla fallen utan ångspärr.

TABELL 4.4. Kondensationsperiod i olika beräkningsfall, 1½-stens tegelvägg.

Läge	Orientering	Inv. fukttillskott	Inv. isolering	Kondensations-period
Lund	utan stråln.	$3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	10 cm min. ull	$1/10-1/3 = 5 \text{ mån}$
Lund	utan stråln.	$3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	15 cm min. ull	$1/9-1/3 = 6 \text{ mån}$
Lund	utan stråln.	$4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	10 cm min. ull	$15/8-1/4 = 7\frac{1}{2} \text{ mån}$
Lund	södervägg	$3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	10 cm min. ull	$1/10-1/1 = 3 \text{ mån}$
Luleå	utan stråln.	$3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	10 cm min. ull	$1/9-1/3 = 6 \text{ mån}$

4.4.3 Yttervägg av 250 mm gasbetongmurverk

I de beräkningar, vid varierande uteklimat, som redovisas i detta avsnitt har gasbetongens materialdata satts till

Värmeledningstal, λ , = 0,22 (W/mK)

Värmekapacitet, $\gamma \cdot c_p = (460 + 4,2 \cdot w) \cdot 10^3$ (J/m³K)

Anggenomsläpplighet, $\delta = (2 + 0,00055 w^2) \cdot 10^{-6}$, $w < 100 \text{ kg/m}^3$ (m²/s)

$7,5 \cdot 10^{-6}$, $w \geq 100$ (m²/s)

Kapillärledningskoefficient, $k = 0,0002 \cdot 10^{-6}$, $w \leq 150$ (m²/s)

$(-0,1275 + 0,00085) \cdot 10^{-6}$ $150 < w < 170$ (m²/s)

$0,002 \cdot 10^{-6}$, $w \geq 170$ (m²/s)

Sorptionskurva, $\phi =$

$w \cdot 0,8/25$ $w < 25$

$0,65 + w \cdot 0,35/65$ $25 \leq w \leq 65$

1 $w > 65$

I FIG 4.18 visas sorptionskurvor för gasbetong, 500 kg/m³, vid absorption och desorption enligt Ahlgren (1972). Två olika linjära approximationer har lagts in. Approximation I är den som angetts ovan.

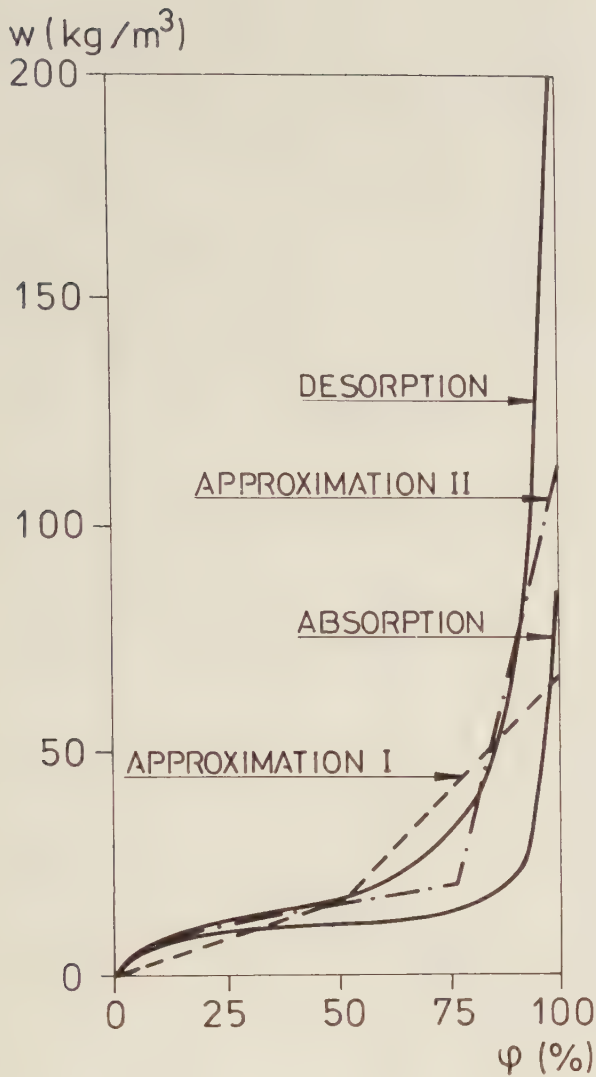


FIG 4.18. Sorptionskurva för gasbetong, 500 kg/m³, med två linjära approximationer.

Inverkan av sorptionskurvans utseende har studerats genom beräkningar på samma sätt som för tegelväggen i FIG 4.9. Uppfuktning och kondensation från torrt tillstånd har betraktats för en 250 mm tjock gasbetongvägg med materialegenskaper enligt ovan. Väggen antas invändigt isolerad med 10 cm mineralull utan ångspärr. Klimatförhållandena är -10°C , 95% ute och $+20^{\circ}\text{C}$, fukttillskott $4 \cdot 10^{-3}$ kg/m³ inne. Resultatet framgår av FIG 4.19. Sorptionskurvans utseende vid höga relativa fuktigheter är givetvis avgörande för efter hur lång tid egentlig kondensation inträder. Med kurvan i approxima-

tion I uppnås 100% i gränsskiktet mot isoleringen efter ca 120 dygn, och med approximation II inte förrän efter ca 180 dygn. I de fortsatta beräkningarna har endast approximation I använts. Man bör emellertid hålla i minnet att de förenklingar som detta innebär kan ha stor inverkan på beräkningsresultatet, och därmed på bedömningen av risken för fuktskador. Approximation I ligger troligen på säkra sidan eftersom många gasbetongkvaliteter har sorptionskurvor med större lutning i det övre området.

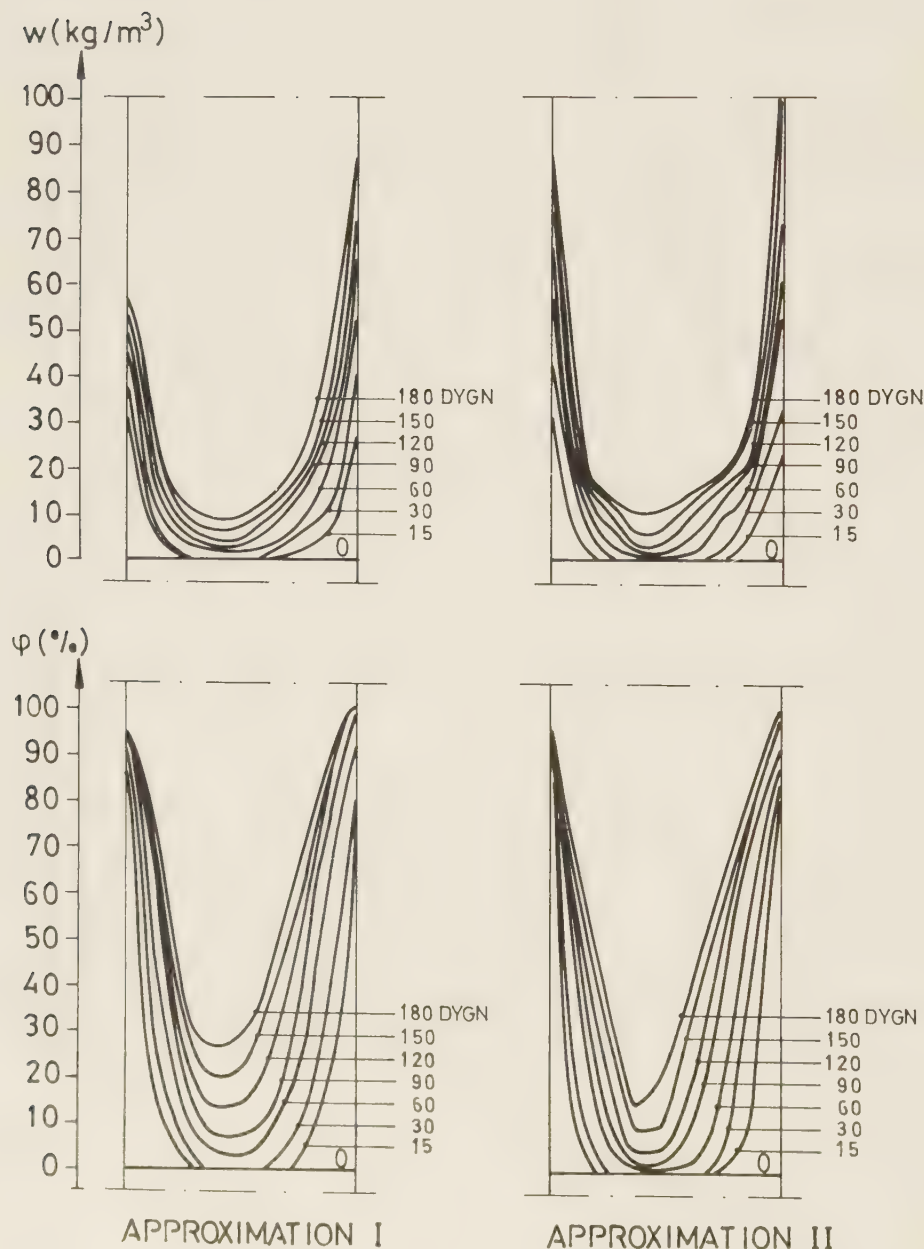


FIG 4.19. Fukthaltens och relativa fuktighetens utveckling i 250 mm gasbetongvägg vid uppfuktning och kondensation. Sorptionskurvor enligt FIG 4.18.

I FIG 4.20 visas beräkningar av fuktbalansen för en gasbetongvägg. Klimatet är Lund, utan strålning mot väggen. Inneklimatet är $+20^{\circ}\text{C}$, fukttillskott $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Ett yttre fuktövergångsmotstånd, motsvarande 2 cm KC-puts med ånggenomsläppligheten $0,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ har använts. För den oisolerade väggen har samma antagande gjorts på insidan. Då väggen isolerats invändigt har det invändiga putsskiktet av beräkningstekniska skäl försumrats. Detta medför troligen att fukthalten i gränsskiktet under perioden med kondensation blir något för liten, eftersom putsen har lägre ånggenomsläpplighet än gasbetongen.

Förutom beräkningar för oisolerad och invändigt tilläggsisolerad vägg har en beräkning med 10 cm utvändigt tilläggsisolering gjorts. Den utvändiga isoleringen har inte antagits ha något ångtätt ytskikt. Fallet har tagits med eftersom det används vid beräkning av fuktrörelser i KAP 8.

Av figuren framgår att årsvariationerna i gasbetongväggen är mycket små. Invändig tilläggsisolering med 10 cm mineralull utan ångspärr höjer väggens fukthalt med i medeltal ca 10 kg/m^3 , vilket motsvarar en ökning av relativa luftfuktigheten med 5 - 10%. Detta måste anses som ganska obetydligt. Det finns en svag tendens till fuktackumulering i väggen. Vid utvändigt tilläggsisolering fås en markant uttorkning omedelbart efter isoleringen. Fukthaltssvängningarna i väggen är sedan motriktade de andra fallen, dvs stigande medelfukthalt under sommaren och minskande under vintern. Fukthalten befinner sig delvis i ett område med liten lutning på sorptionskurvan vilket medför att årsvariationerna blir något större och snabbare än för de andra fallen.

FIG 4.21 visar fukthaltsfördelningen i väggen vid fyra tidpunkter under sista året av beräkningen. Under ingen del av året fås kondensation i den invändigt tilläggsisolerade väggen. Under hösten och vintern stiger fukthalten i gränsskiktet, men den ligger hela tiden betydligt under vad som motsvarar 100% relativ luftfuktighet. Den utvändiga isoleringen medför att speciellt väggens yttre del torkar ut.

FIG 4.22 och 4.23 visar beräkningar med ett annat uteklimat, Luleå. Alla andra förutsättningar är samma som för fallet i Lund. Beräkningarna ger som resultat att fuktinnehållet är mindre än i samma vägg i Lund. Detta gäller både med och utan tilläggsisolering.

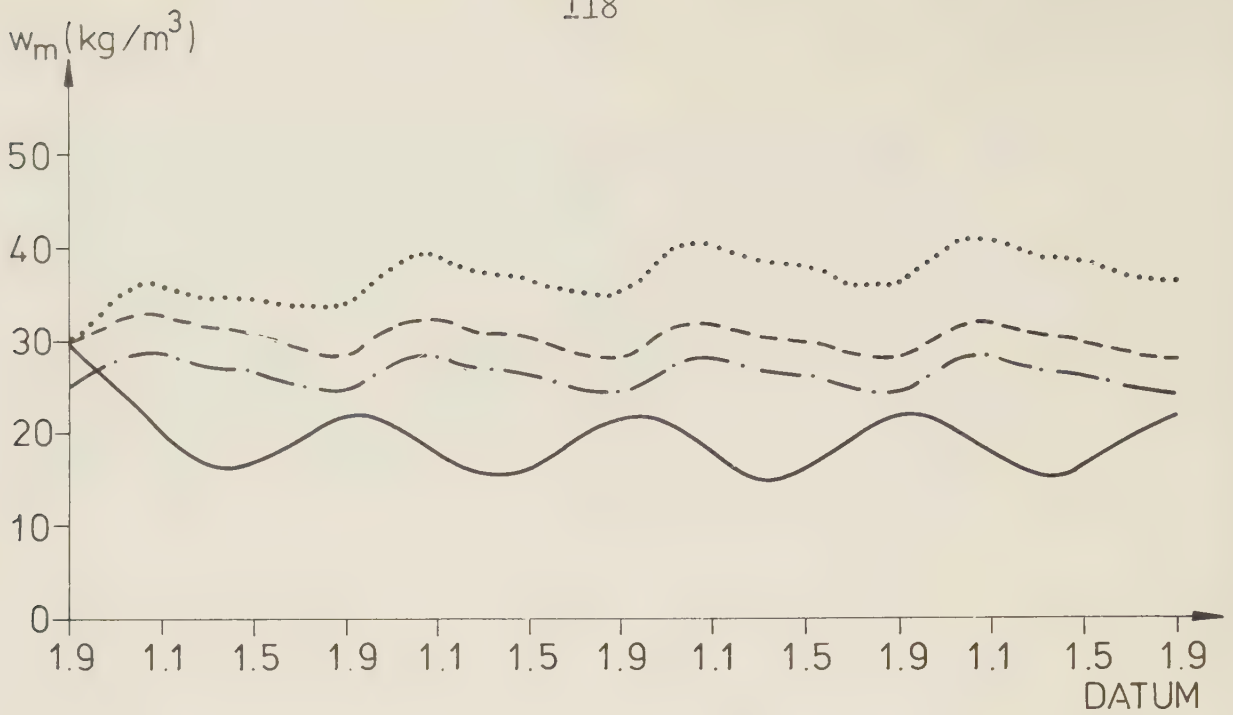


FIG 4.20. Medelfukthaltens variation i 250 mm gasbetongvägg, Lund, utan strålning, med och utan tilläggsisolering.

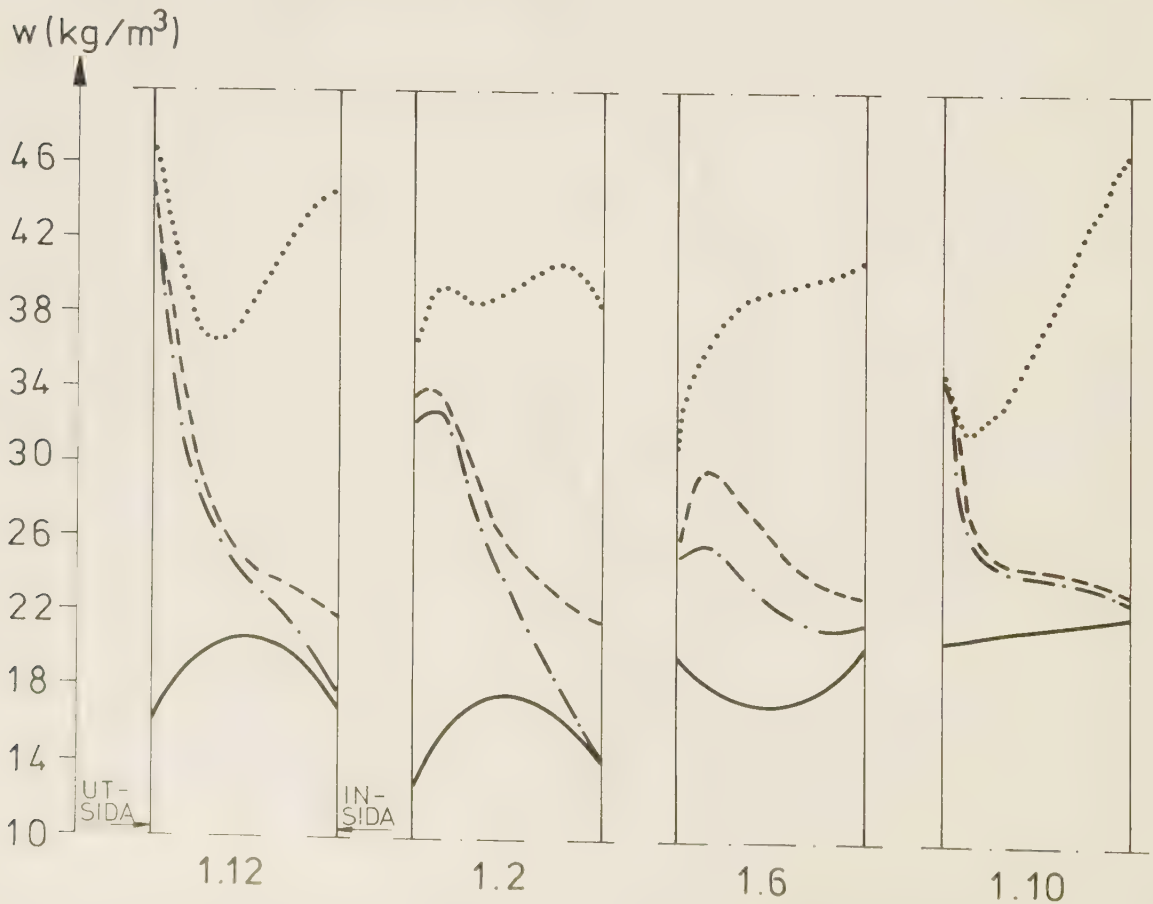


FIG 4.21. Fukthaltsfördelningar i 250 mm gasbetongvägg, Lund, som i FIG 4.20

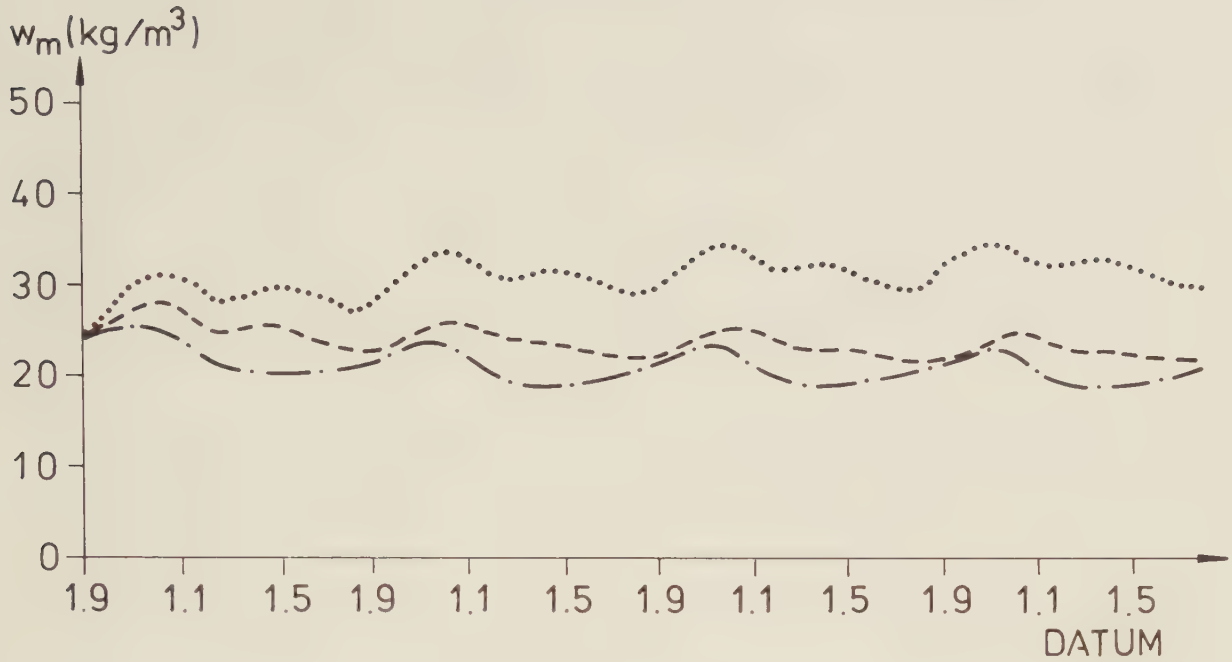


FIG 4.22. Medelfukthaltens variation i 250 mm gasbetongvägg, Luleå, utan strålning, med och utan invändig tilläggsisolering.

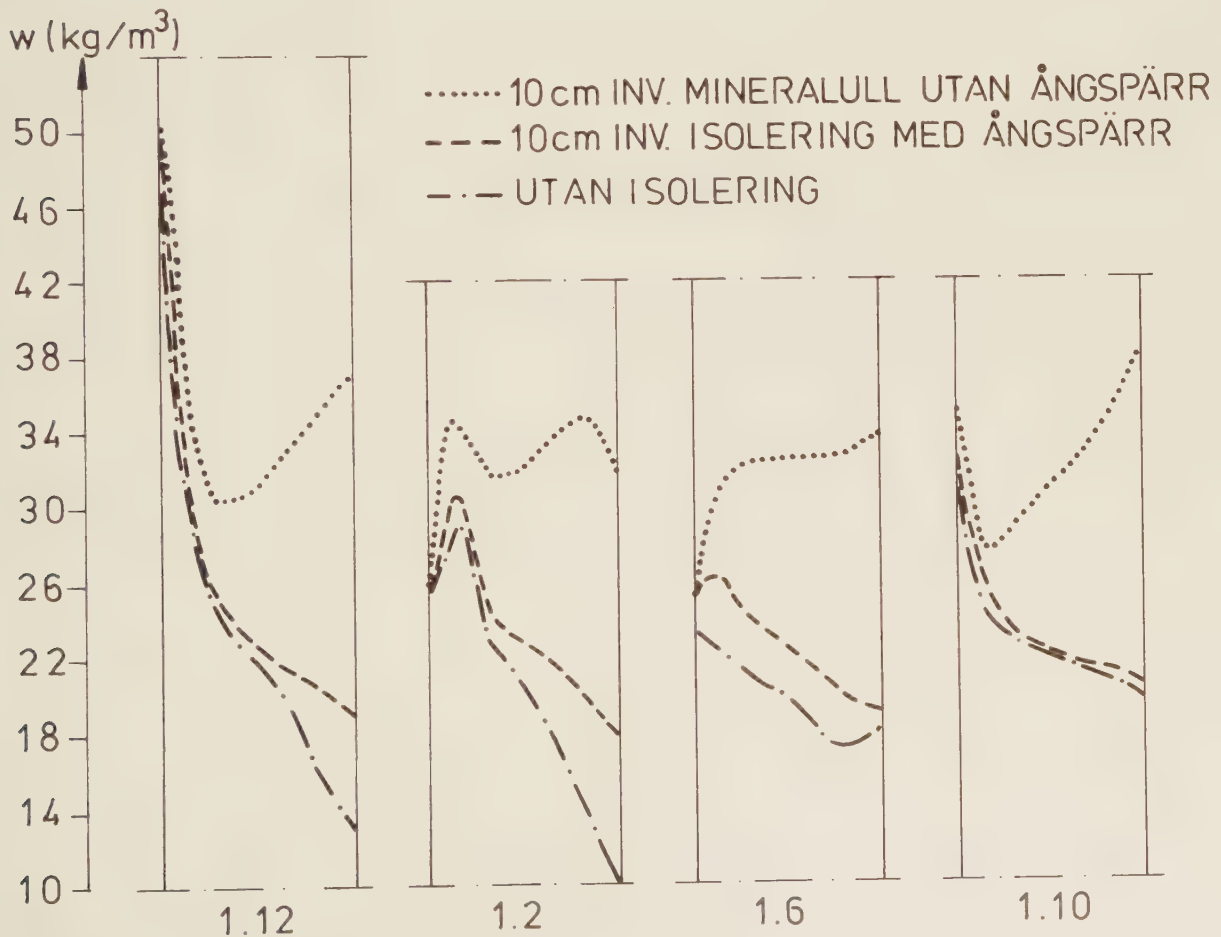


FIG 4.23. Fukthaltsfördelningar i 250 mm gasbetongvägg, Luleå, som i FIG 4.22.

4.4.4 Källaryttervägg av 250 mm gasbetong

Källarytterväggar utsätts, som andra grundkonstruktioner, för fukt utifrån, markfukt, och fukt inifrån, luftfukt.

För att skydda källarytterväggar mot att markfukt tränger in, är det vanligt att asfaltstryka dem utvändigt. Asfaltstrykningen fungerar som kapillärbrytande skikt och hindrar även diffusion av vattenånga mellan väggen och marken.

Källarytterväggen får även en utvändig värmeisolering av omgivande mark. Effekten av denna beror på hur långt ner i marken det betraktade snittet ligger, jordartens egenskaper och eventuellt förekommande grundvatten. I FIG 4.24 visas ett fall av värmeströmning i marken kring en källare. Vid källarytterväggen följer värmeströmmen ungefär cirkulärcylindriska ytor i det tvådimensionella fallet. I närheten av markytan kan man inte räkna med någon utvändig isolering av jorden. Det kan då finnas förutsättningar för kondensation i väggens yttre delar, vid asfaltstrykningen.

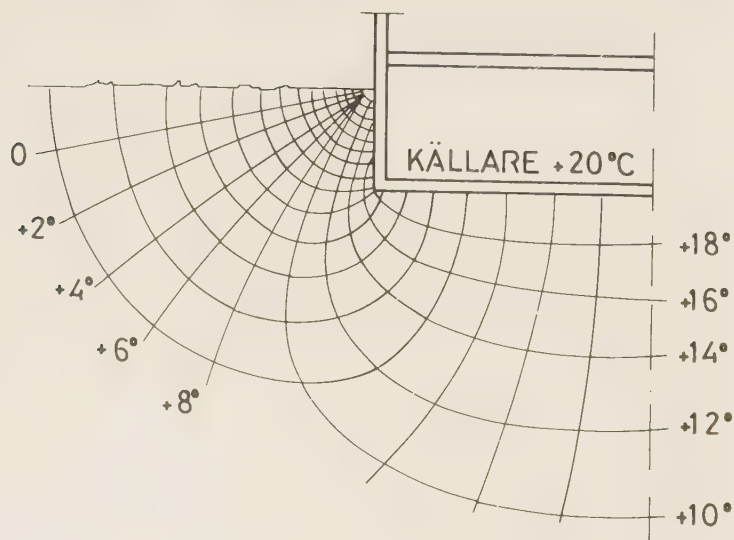


FIG 4.24. Exempel på värmeströmning under källare. Öändligt lång byggnad.
Källa: Kommentarer till Svensk Byggnorm 1977:3.

Tilläggsisolering av källarytterväggar brukar av förklarliga skäl göras invändigt. Ofta rekommenderas då att ny ångspärr inte skall användas, eftersom denna hindrar uttorkning av väggen inåt, mot rummet. Man kan ju inte alltid förutsätta att väggen är fri från belastning av markfukt eftersom det kan finnas brister i asfaltstrykningen och dåligt fungerande dränering.

Källarytterväggen kan delas in i tre olika delar med avseende på dess funktion ur fuktsynpunkt (se FIG 4.25). Dessa delar är

1. Ovan mark. Väggen har ingen utvändig fuktisolering, och är i direkt kontakt med uteluften.
2. I markytan. Väggen är utvändigt fuktisolerad. Värmeisolering av omgivande mark kan inte påräknas.
3. Under mark. Väggen är utvändigt fuktisolerad. Omgivande mark verkar som utvändig värmeisolering.

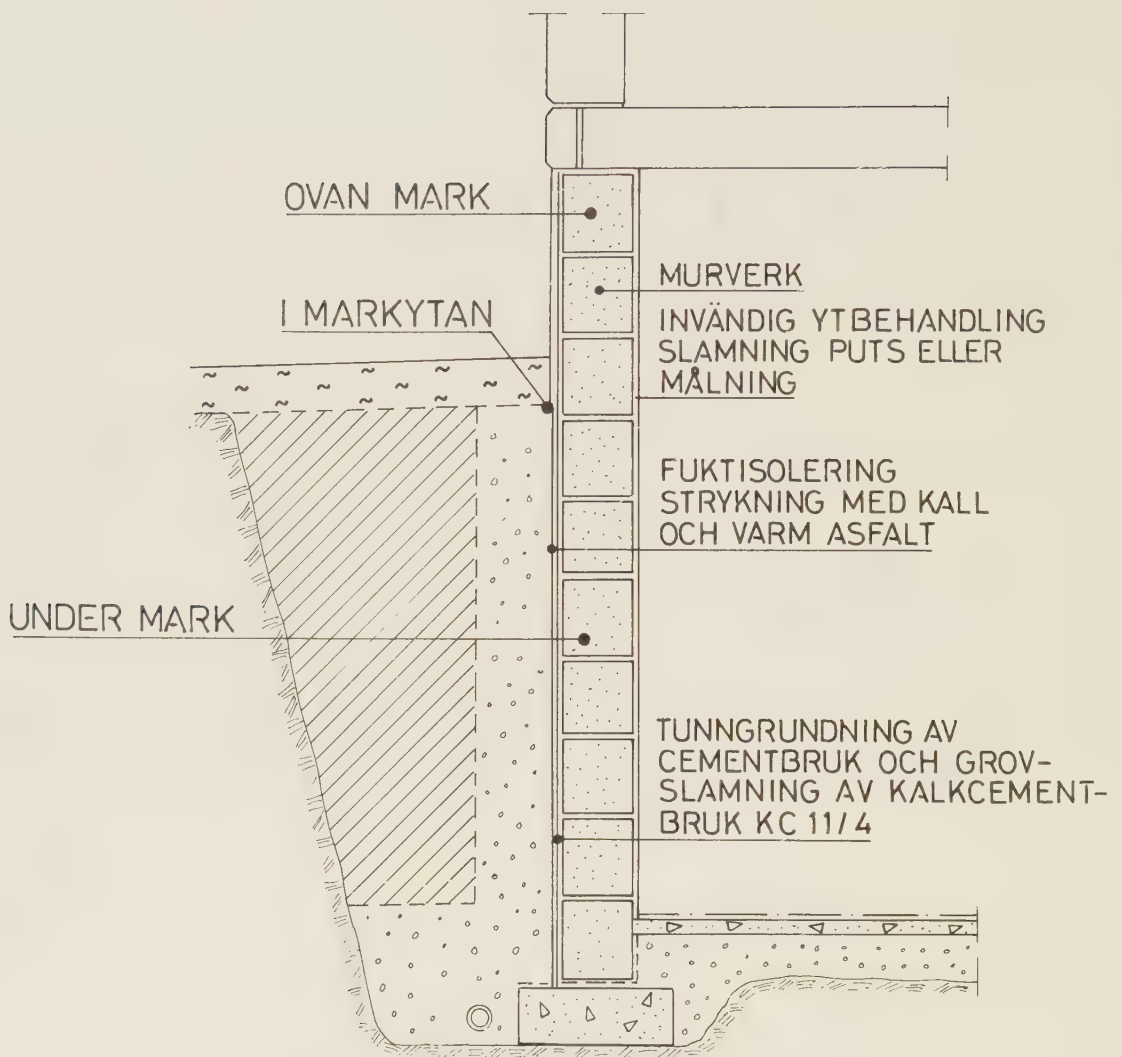


FIG 4.25. Traditionell källaryttervägg av murverk.

De olika delarna är inte på något sätt avgränsade från varandra eftersom fukt- och värmetransporten inte är endimensionell. I fortsättningen behandlas dock var del för sig, endimensionellt. Man bör emellertid hålla i minnet att fukttransport kommer att ske från de fuktigare till de torrare delarna av källarytterväggen.

Den murade gasbetongväggen ovan mark har behandlats i KAP 4.4.3. I detta avsnitt redovisas icke stationära fuktberäkningar för de andra delarna av källarytterväggen.

Följande förutsättningar har valts. Källarytterväggen antas bestå av 250 mm murverk med samma materialegenskaper som i KAP 4.4.3. Den utvändiga fuktisoleringen har förutsatts vara helt diffusionstät. Väggen ligger

i Lund. Klimatet i källaren har antagits vara $+18^{\circ}\text{C}$, fukttillskott $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Omgivande jords värmeledningstal har valts till $1,16 \text{ W/mK}$. Detta anges av Granholm (1971) för lera, normalfuktigt material. Flera jordarter har betydligt högre värmeledningstal vilket bör inverka negativt på fukttillståndet i väggen. Solstrålning på mark eller vägg har inte antagits förekomma, av samma skäl som tidigare.

För den del av källarytterväggen som ligger i markytan har förutsatts att omgivande jord inte inverkar på temperaturfördelningen. Då ett snitt nere i marken betraktas har jordens inverkan approximerats med ett utvändigt värmemotstånd. Detta motsvaras av längden av en kvartscirkelbåge i ett material med värmeledningstalet λ . Om cirkelns radie är lika med $r \text{ m}$ fås

$$m_u = \frac{0,5 \pi r}{\lambda} \quad (\text{m}^2\text{K/W})$$

För snittet 1 m under markytan blir värmemotståndet på utsidan då lika med $0,5\pi/\lambda$.

Denna approximation medför att markens värmelagrande förmåga helt försummas. En flerdimensionell beräkning av fukt- och temperaturförhållandena har dock ansetts vara alltför omfattande. Approximationen medför att beräkningen ger en för pessimistisk bild av fuktförhållandena i väggen. Detta diskuteras något mera i det följande.

Under mark (ca 1 m)

Medelfukthaltens variation i väggen under fyra år med och utan invändig tilläggsisolering visas i FIG 4.26. För den oisolerade väggen antogs först begynnelsefukthalten 75 kg/m^3 . Av beräkningen framgick att denna var för hög. I fortsättningen sattes begynnelsefukthalten till 50 kg/m^3 .

I den oisolerade väggen stiger fukthalten under sommaren och den tidiga hösten och sjunker under vintern och våren.

Invändig tilläggsisolering med 10 cm mineralull utan ångspärr medför att fukttinnehållet ökar under hela beräkningsperioden. 5 cm invändig mineralull har betydligt mindre inverkan. Då isoleringen görs med ny ångspärr invändigt händer givetvis ingenting med medelfukthalten eftersom ingen märk-

bar transport kan ske vare sig in i eller ut ur väggen. Då isoleringen görs av cellplast kan viss diffusion in i väggen äga rum. Fukthalten ökar dock mycket långsamt.

Fukthaltsfördelningen i väggen vid fyra olika tidpunkter under det fjärde året av beräkningen visas i FIG 4.27. I fallet utan tilläggsisolering är relativa fuktigheten i yttre delen av väggen omkring 100% hela året. Den del av väggen som är närmast inneluften är torr under vintern och våren och något fuktigare under sommaren och hösten, eftersom den i stort sett är i jämvikt med inneluftens relativa fuktighet.

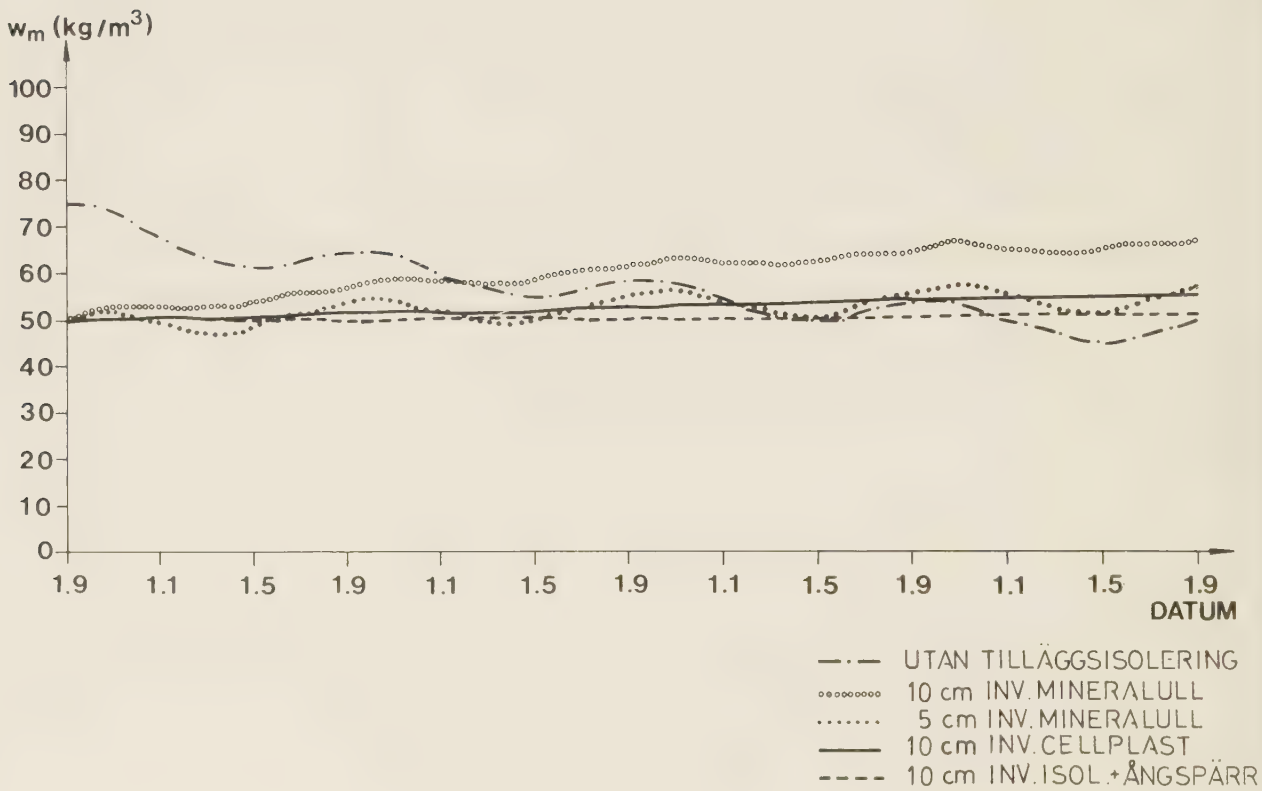


FIG 4.26. Fuktbalans för utvändigt fuktisolerad källaryttersvägg av 250 mm gasbetong. 1 m under mark. Läge Lund. Innetemperatur +18 °C, fukttillskott $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

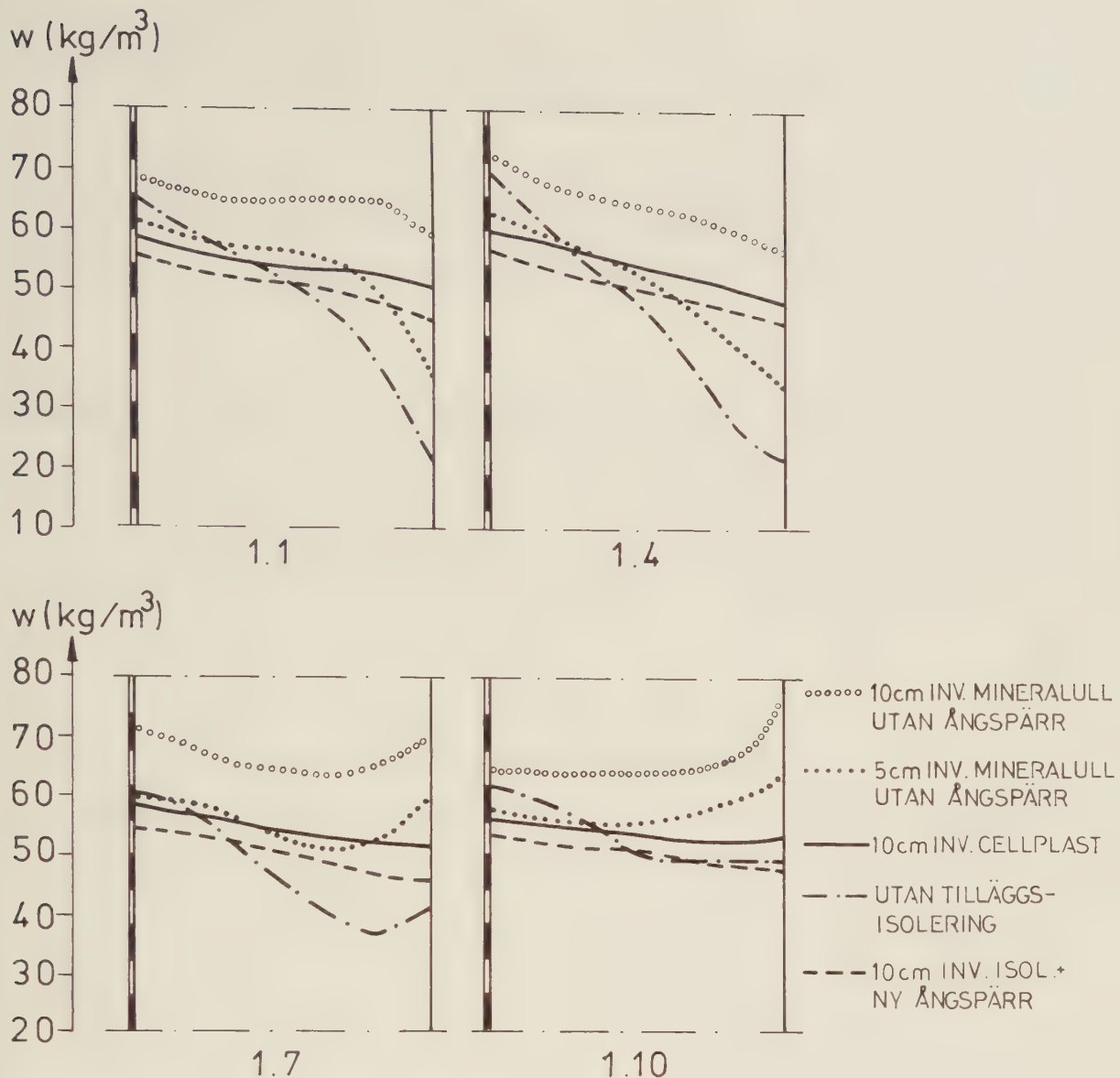


FIG 4.27. Fukthaltsfördelning vid fyra tidpunkter i källaryttersvägg av 250 mm gasbetong. Samma fall som i FIG 4.26, fjärde året av beräkningen.

Invändig tilläggsisolering av väggen med ca 10 cm mineralull utan ångspärr på isoleringens varma sida inverkar på följande sätt. Temperaturen i den del av väggen som är närmast isoleringen sjunker, medan den yttre delens temperatur är i det närmaste oförändrad. Mineralullsisoleringens ånggenomgångsmotstånd är litet och hindrar inte diffusionen i någon nämnvärd grad. Totalt sett ökar väggens medelfukthalt. Fyra år efter tilläggsisoleringen har den stigit med 15 kg/m^3 . Den ligger då i närheten av 100% enligt sorptionskurvan. Ökningen fås i huvudsak under sommaren och hösten. Uttorkningen inåt är nu mycket liten eftersom temperaturskillnaden mellan den befintliga väggen och inneluften är betydligt större än före tilläggsisoleringen. Under sommaren tycks det ske en viss transport från väggens

yttre del mot insidan. Den höga ånghalten inne medverkar dock till att uttorkning inte kan ske i någon högre grad.

I fallet med invändig ångspärr finns en svag fukthaltsgradient i väggen, beroende på temperaturförhållandena. Samma principiella utseende finns då väggen är isolerad med cellplast, även om inneluftens fuktinnehåll in-
verkar mera.

Inverkan av en mindre isolering, 5 cm mineralull, har också beräknats. I detta fall är betingelserna för uttorkning under vissa tidsperioder mot rumsluften betydligt gynnsammare än för den tjocka isoleringen, eftersom temperaturskillnaden mellan väggen och rumsluften är mindre. Fukthalten ligger därmed på en ganska låg nivå, och har tydliga variationer under året med maximum i början av hösten och minimum i början av våren.

För att få en uppskattning av inverkan av jordens värmelagrande förmåga på fukttillståndet har en beräkning gjorts där både gasbetongväggen och ett skikt av marken medverkat i den icke stationära värmetransporten. Markskiktets tjocklek har även i denna beräkning antagits vara $\pi/2$ m. Värme kapaciteten, $\gamma \cdot c_p$, har valts till $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ J/m}^3\text{K}$. I FIG 4.28 visas medelfukthaltens årsvariation i väggen då denna är invändigt till-
läggsisolerad med 10 cm mineralull utan ny ångspärr. I denna beräkning finns inte någon tendens till ökad fukthalt i väggen på grund av till-
läggsisoleringen.

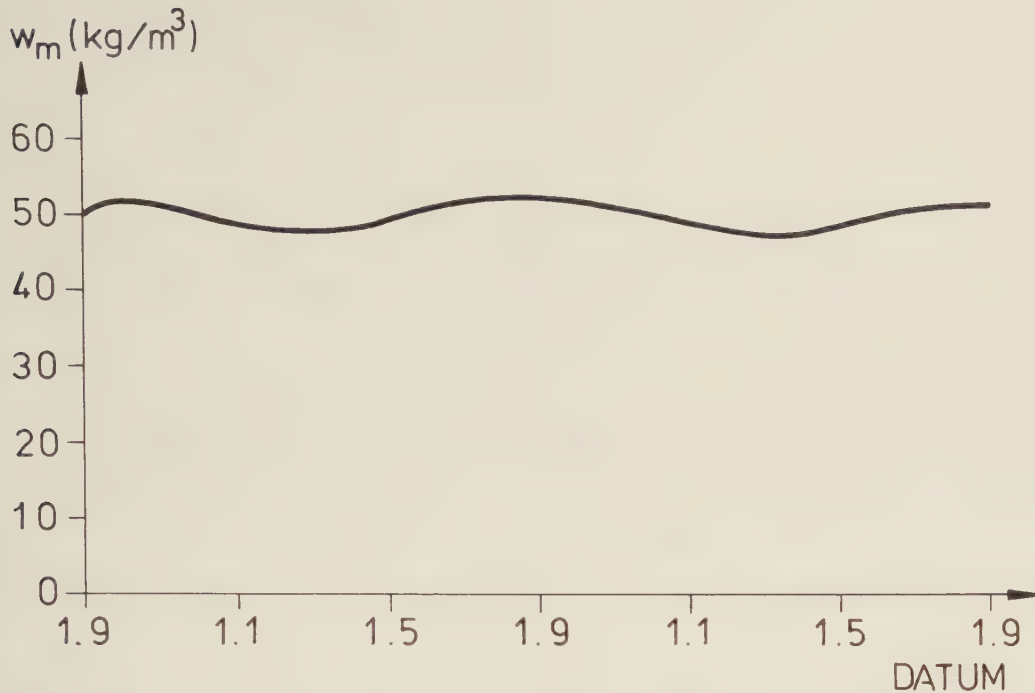


FIG 4.28. Beräkning av medelfukthalt i källaryttervägg av 250 mm gasbetong, 1 m under mark, invändigt tilläggsisolerad med 10 cm mineralull utan ångspärr, med hänsyn tagen till inverkan av markens värmelagrande förmåga.

I markytan

I referensfallet, dvs utan invändig tilläggsisolering, varierar väggens medelfukthalt under året omkring värdet ca 50 kg/m^3 varför man kan anta att den valda begynnelsefukthalten stämmer väl överens med verkliga förhållanden. FIG 4.29 visar medelfukthaltens variation i väggen med och utan isolering under ca 4 år. I FIG 4.30 visas fukthaltsfördelningen i väggen vid några olika tidpunkter fjärde året av beräkningen.

Temperaturskillnaden över väggen är större än då väggen antogs ligga en bit ner i marken. Under vinter och vår är fukthalten hög i väggens yttre delar och låg i de inre. Där relativa fuktigheten i väggen är omkring 100% kommer fukttransporten att gå från områden med högre temperatur till områden med lägre temperatur. Samtidigt fås uttorkning av väggens inre delar mot rumsluften, vars ånghalt är låg. På sommaren är temperaturgradienten mindre. Fukt transporteras inåt från väggens yttre delar, och från rumsluften med hög ånghalt fås en transport till den tidigare torra inre delen av väggen. Nettoresultatet blir alltså även i detta fall en uppfuktning sommartid.

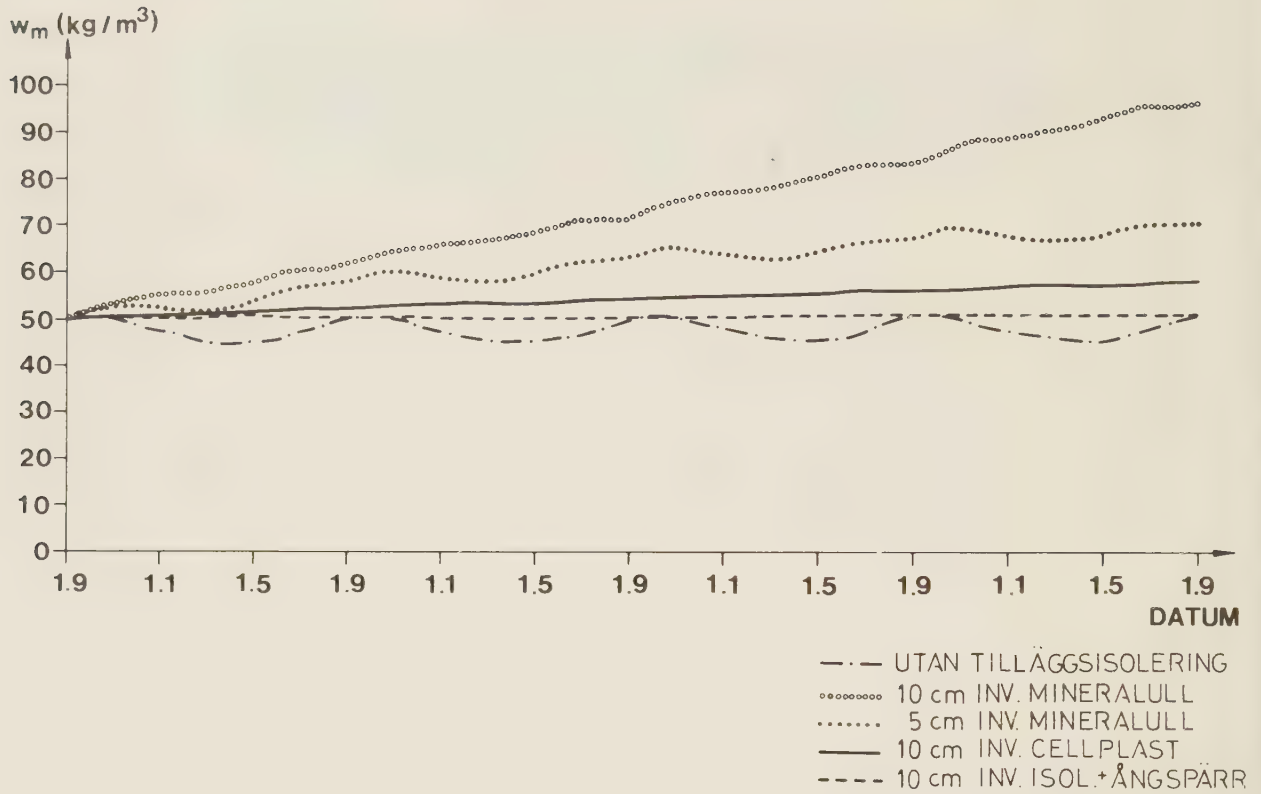


FIG 4.29. Fuktbalans för utvändigt fuktisolerad källaryttersvägg av 250 mm gasbetong. I markytan. Läge Lund.

En invändig tilläggsisolering med ca 10 cm mineralull utan ångspärr på isoleringens varma sida, förvärrar, liksom i fallet under mark, situationen genom att den stora temperaturgradienten över isoleringen gör uttorkning inåt omöjlig under större delen av året. Medelfukthalten i väggen ökar mycket kraftigt i det beräknade fallet, ca 45 kg/m^3 på ca 4 år. Fukthalten ligger ständigt över det hygroskopiska området i hela väggen. På vintern kondenserar fukt i den del av väggen som är närmast isoleringen. Genom diffusion transporteras fukten vidare ut i väggen, i temperaturgradientens riktning. På sommaren fås en viss transport åt andra hållet.

Isolering med cellplast i stället för mineralull medför endast mycket liten ökning av medelfukthalten i väggen, fast något större än i fallet ovan mark, vilket beror på den större temperaturskillnaden över väggen.

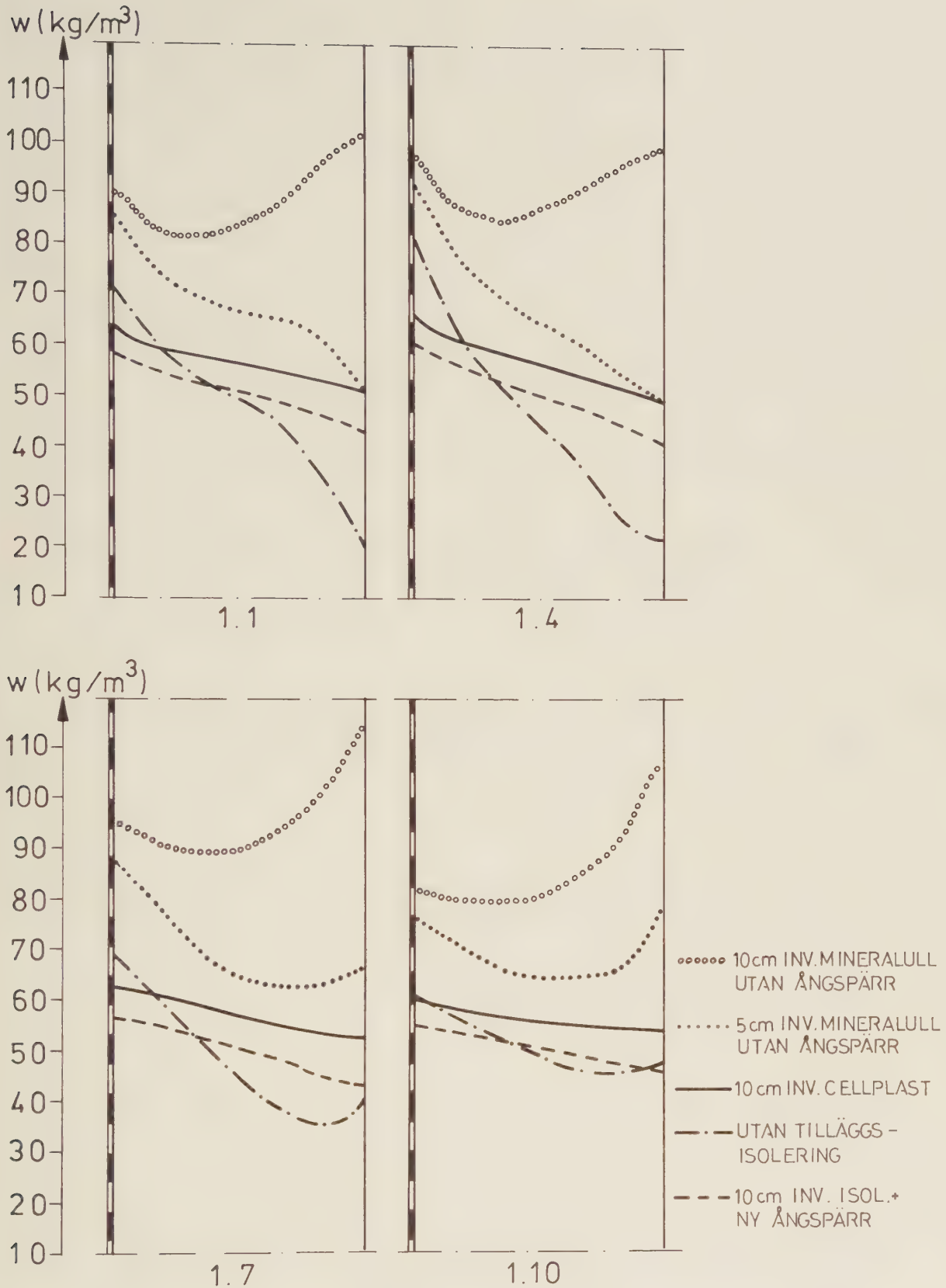


FIG 4.30. Fukthaltsfördelningen vid olika tidpunkter i källaryttervägg av 250 mm gasbetong med och utan invändig tilläggsisolering. I markytan. Läge Lund.

Beräkningarna visar att det finns stora risker för kondensation i de delar av källarytterväggen som ligger nära markytan då väggen isoleras invändigt utan ny ångspärr. Motivet för att utesluta ångspärren är att markfukt som kommer in i väggen utifrån inte kan torka ut inåt. Detta diskuteras vidare i samband med de allmänna slutsatserna i KAP 4.4.7.

4.4.5 Massivt tak av 200 mm gasbetong

Det massiva gasbetongtaket är en konstruktion som behandlats av flera forskare, bl a Sandberg (1973). I detta avsnitt redovisas några beräkningar av förhållandena vid invändig tilläggsisolering.

Taktäckningen har förutsatts vara helt ångtät. Någon invändig ytbehandling som påverkar fuktförhållandena finns inte. Materialdata har valts som för de tidigare behandlade gasbetongkonstruktionerna, med undantag för värmeledningstalet.

$$\lambda = 0,11 + 0,001 w \quad (\text{W/mK})$$

Taket är horisontellt och ligger i Lund. Inneklimatet är $+20^{\circ}\text{C}$, fukttillskott $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Begynnelsefukthalten har satts till 25 kg/m^3 . Taktäckningens absorptionsfaktor för strålning har satts till 0,9.

FIG 4.31 visar medelfukthaltens variation i taket i tre fall. I två av fallen har taket antagits vara permanent skuggat. Invändig tilläggsisolering har gjorts med 5 respektive 10 cm mineralull utan ångspärr. I det tredje fallet är taket inte skuggat och den invändiga tilläggsisoleringen är 10 cm mineralull utan ångspärr.

Då taket inte utsätts för solstrålning ökar medelfukthalten svagt, men ganska konstant. Vattenånga transporteras upp mot taktäckningen och kondenserar vintertid. Tydliga årstidsvariationer finns då isoleringen är 5 cm tjock, men inte då den är 10 cm. Detta framgår också av FIG 4.32, som visar fukthaltsfördelningen i taket under fjärde året efter tilläggsisolering, för de två fallen utan strålning.

Solstrålningens inverkan är mycket stor. I detta fall finns knappast någon tendens till ökad fukthalt trots den kraftiga invändiga tilläggsisoleringen.

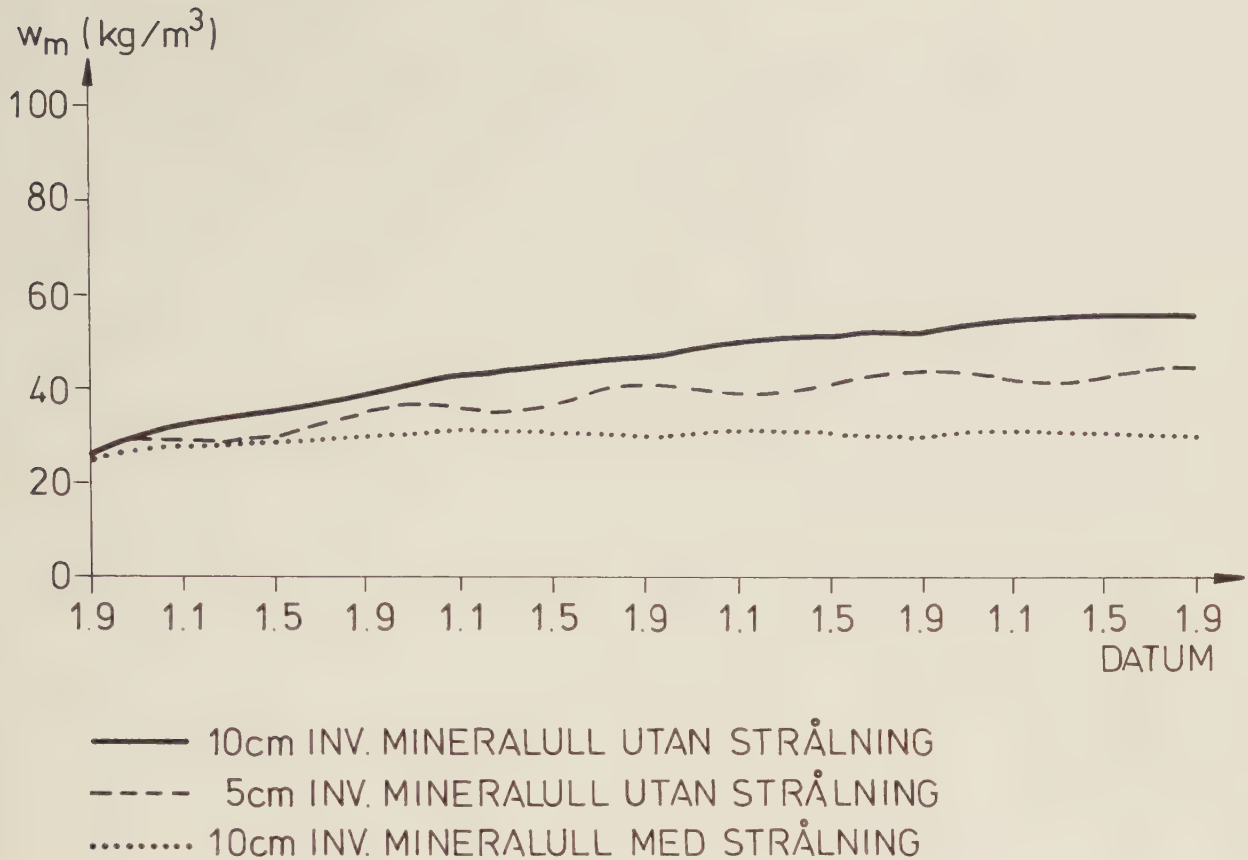


FIG 4.31. Medelfukthaltens variation efter invändig tilläggsisolering utan ångspärr av 200 mm gasbetongtak, Lund, med och utan solstrålning.

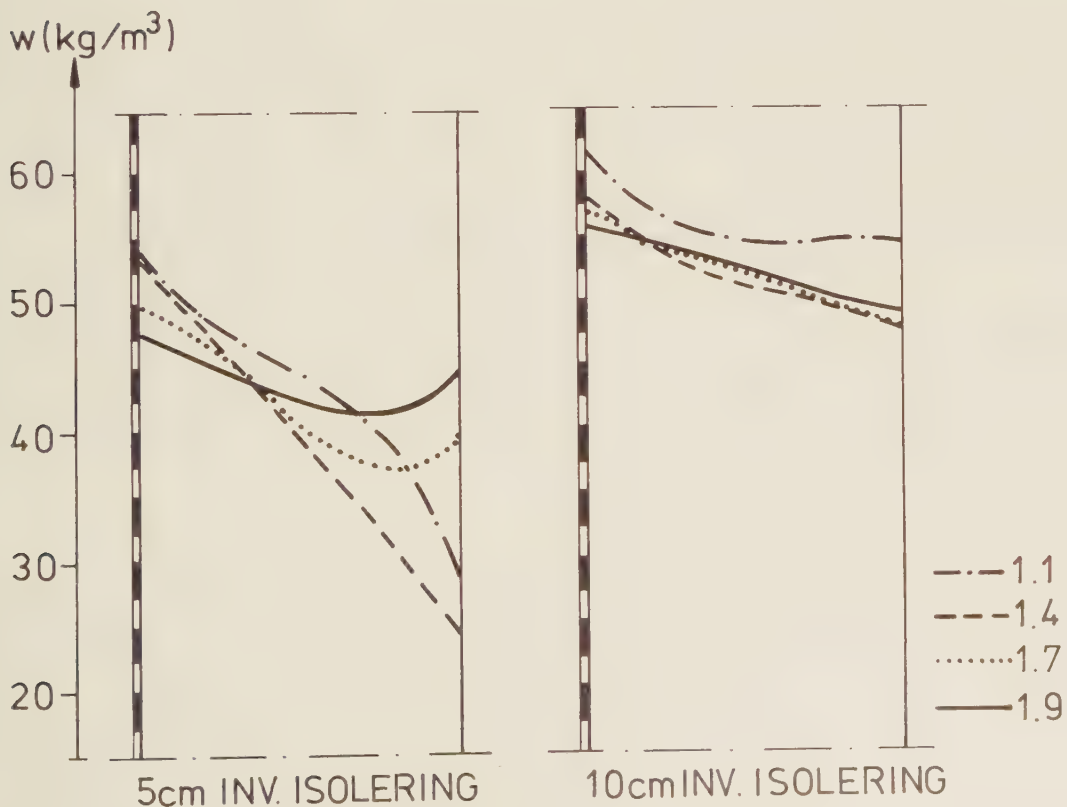


FIG 4.32. Fukthaltsfördelning i 200 mm gasbetongtak, Lund, med invändig tilläggsisolering. Ingen strålning. Fjärde året efter isoleringen.

4.4.6 Trävägg

Ytterväggar helt eller delvis av trä kan vara aktuella för tilläggsisolering. Eftersom trä är ett fuktkänsligt material som kan angripas av mögel och röta är det intressant att göra beräkningar av hur invändig tilläggsisolering påverkar fuktbalansen i sådana konstruktioner.

En konstruktion bestående av ett 6" (ca 15 cm) massivt träskikt har valts som exempel. Konstruktionen kan vara en timmer- eller plankvägg med in- och utvändig träbeklädning.

Följande materialdata har använts

$$\begin{aligned} \text{värmeledningstal, } \lambda &= 0,12 + w/4000 && (\text{W/mK}) \\ \text{värmekapacitet, } \gamma \cdot c_p &= 1150 \cdot 10^3 + 4,2 \cdot w \cdot 10^3 && (\text{J/m}^3\text{K}) \\ \text{ånggenomsläpplighet, } \delta &= 0,15 \cdot 10^{-6} && (\text{m}^2/\text{s}) \\ \text{kapillärledningskoefficient, } k &= 0, w < 150 && (\text{m}^2/\text{s}) \\ &0,0014 \cdot 10^{-6} \quad w \geq 150 && (\text{m}^2/\text{s}) \\ \text{sorptionskurva, } \phi &= 0,007 w, w \leq 30 \\ &-0,16 + 0,012 w, 30 < w \leq 80 \\ &0,57 + 0,003 w, 80 < w \leq 150 \\ &1, w > 150 \end{aligned}$$

Väggen ligger i Lund. Inneklimatet är $+20^\circ\text{C}$, fukttillskott $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Ingen strålning antas träffa väggen. I FIG 4.33 visas medelfukthaltens variation i väggen under fyra år då väggen är oisolerad samt invändigt tilläggsisolerad med 10 cm mineralull med och utan ny ångspärr.

Då väggen är oisolerad är medelfukthalten högst i början av hösten och lägst mitt i vintern. Invändig tilläggsisolering med ny ångspärr medför att årsvariationerna praktiskt taget försvinner och att medelfukthalten blir något högre än tidigare under hela året.

Om tilläggsisoleringen görs utan ångspärr ökar fukttinnehållet i väggen märkbart, men inte drastiskt. Fukthalten stiger ännu fyra år efter isoleringen. Vid denna tid har, enligt beräkningen, egentlig kondensation ännu inte ägt rum, trots att en stationär beräkning skulle visa kondensation under vintern. Detta beror givetvis på materialets stora fuktkapacitet. I FIG 4.39 visas fukthaltsfördelningen i väggen vid några tidpunkter under beräkningens fjärde år. I fallet invändig tilläggsisolering utan ångspärr

är fukthalten i väggen under hela året så hög att den motsvarar relativ fuktighet omkring 80 - 90% enligt den antagna sorptionskurvan.

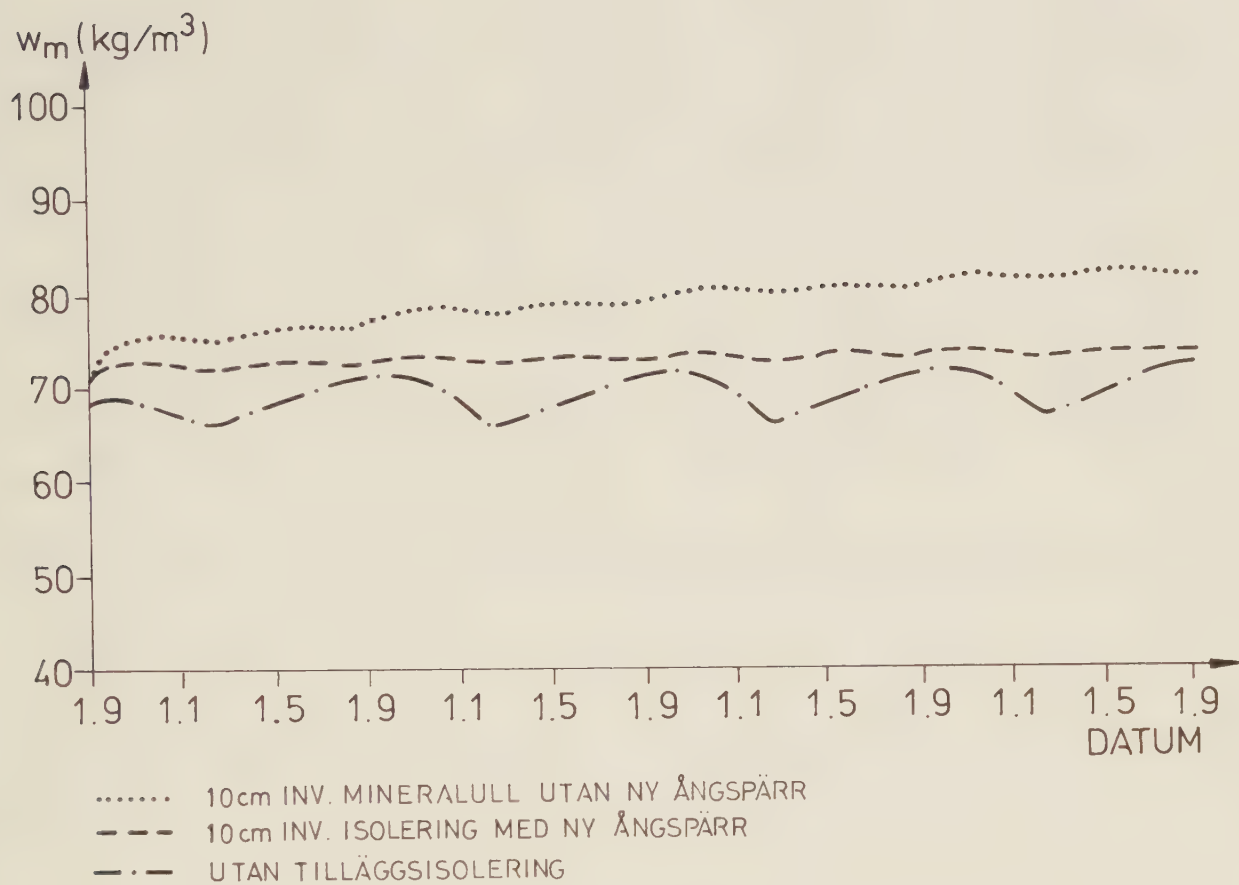


FIG 4.33. Medelfukthaltens variation under fyra år i en 6" massiv trävägg med och utan tilläggsisolering. Lund, utan strålning.

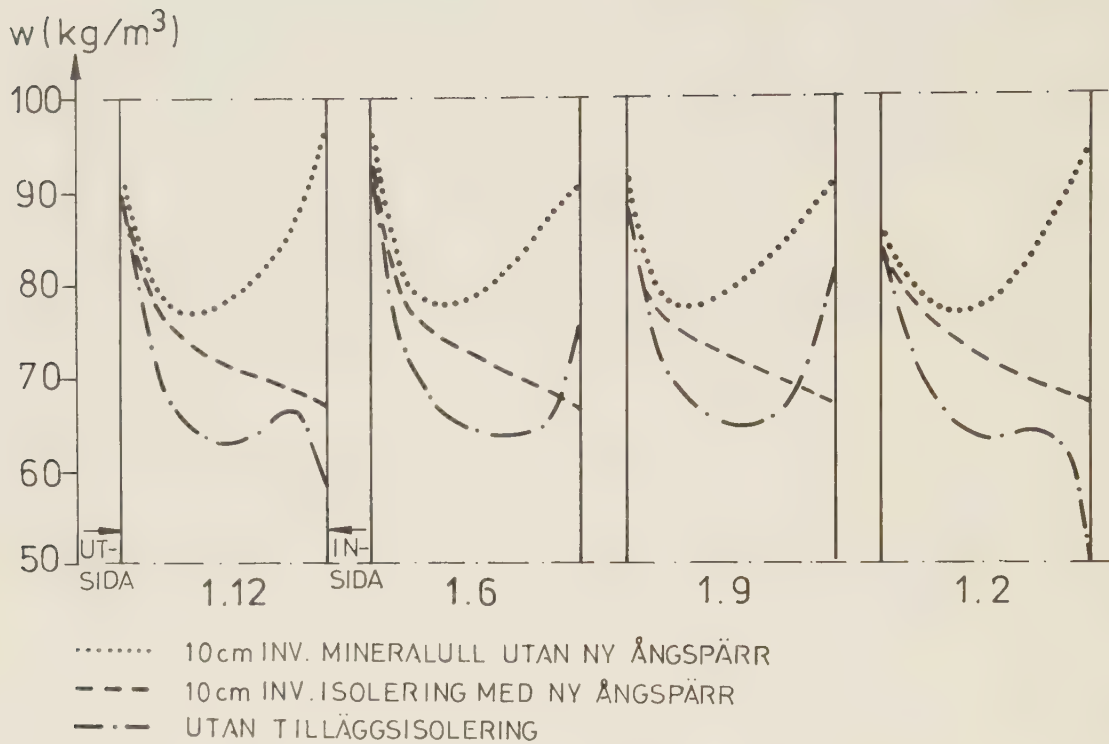


FIG 4.34. Fukthaltsfördelning i 6" trävägg före samt under fjärde året efter invändig tilläggsisolering.

4.4.7 Diskussion och slutsatser

Resultatet av datorberäkningar är givetvis starkt beroende av de förutsättningar som görs beträffande materialegenskaper, randvillkor och lämplig beräkningsmodell. Fuktskador kan bli mycket dyrbara. Det är därför lämpligt att göra antaganden som, enligt vad man kan bedöma, ligger på säkra sidan. Alltför stränga förutsättningar kan emellertid överdriva risken för fuktskador på ett orimligt sätt.

I några av de redovisade beräkningarna påverkas inte konstruktionens fuktbalans på något drastiskt sätt om man gör en kraftig invändig tilläggsisolering utan ny ångspärr. I befintliga byggnadsdelar där ingående material har stor fuktkapacitet ökar fukthalten mycket långsamt efter isoleringen. I vissa fall inträffar inte beräkningsmässig kondensation överhuvudtaget. I konstruktioner där ingående material har låg fuktkapacitet är kondensationsrisken däremot stor. De fuktmängder som tillförs genom kondensation är i allmänhet små jämfört med t ex slagregnets inverkan. Stenmaterial

bör klara dem utan vidare. För befintliga byggnadsdelar av trä kan beständighetsproblem finnas vid höga fukthalter även om egentlig kondensation inte förekommer. Som exempel kan nämnas hussvampen (*Merulius lacrymans*) som kan utvecklas vid fuktinnehåll motsvarande 80 - 90% relativ fuktighet i virket. Lägsta temperatur för tillväxt är $+3^{\circ}\text{C}$, men gynnammaste tillväxttemperatur är ca 20 - 25 $^{\circ}\text{C}$. Dessa förutsättningar kan finnas sommartid i en invändigt tilläggsisolerad trävägg, se t ex FIG 4.34. Tilläggsisolering innehåller oftast träreglar som kan angripas även om resten av konstruktionen består av fukttåligt material.

En speciellt viktig förutsättning i alla beräkningar är fukttillskottet inomhus. De dimensionerande värden som anges i kommentarer till Svensk Byggnorm är ett osäkert underlag för bedömning av tillståndet under en längre tid. Högre fukttillskott än vad som i allmänhet antagits i beräkningarna kan medföra kraftigt ökade kondensmängder.

Generellt bör därför rekommenderas att man använder ångspärr vid invändig tilläggsisolering med mineralull av befintliga tak och ytterväggar. Undantag kan eventuellt göras då den befintliga konstruktionen har stor fuktkapacitet och varken den eller tilläggsisoleringen kan skadas av tillfällig kondensation. Ett exempel på detta skulle kunna vara det massiva gasbetongtaket. Vid osäkerhet är det klokt att begränsa isolertjockleken.

I källarytterväggen är förhållandena mera svårbedömda beroende på osäkerheter om markens isolerande inverkan och funktionen hos befintligt skydd mot markfukt. Inomhusklimatet i en källare kan också vara mycket varierande. Troligt är dock att invändigt tilläggsisolerade källare har ungefär rumstemperatur.

Datorberäkningar har endast gjorts för källarytterväggar av gasbetong. Om väggen består av betong, massiv eller murad, är kondensationsrisken efter invändig tilläggsisolering större eftersom betong har sämre värmeisoleringsförmåga, lägre ånggenomsläpplighet och mindre fuktkapacitet än gasbetong.

Vid kraftig invändig tilläggsisolering kan det finnas stor risk för kondensation i källarytterväggen i närheten av markytan. För att den fuktiga väggen skall torka ut inåt krävs ånghaltsskillnad mellan väggen och ineluften. Vid kondensation i väggen måste mätnadsånghalten i väggen vara

större än inneluftens ånghalt för att uttorkning skall kunna ske. Den invändiga isoleringen medför att temperaturen, och därmed mätnadsånghalten, blir så låg att uttorkning inte kan ske under större delen av året. Isoleringen fungerar då som en spärr mot uttorkning inåt men inte mot kondensation av luftfukt inifrån.

Allmänna rekommendationer för tilläggsisolering av befintliga källarytterväggar blir:

1. Om det finns skäl att anta att markfukt tränger in i väggen (t ex fuktfläckar och saltutslag) bör detta åtgärdas. I samband med detta kan utvändig tilläggsisolering göras, kanske endast av källarväggens övre del, eftersom de största värmeförlusterna är där. Invändig tilläggsisolering, vare sig med eller utan ångspärr bör inte göras om fuktbelastningen utifrån är stor.
2. Vid källarytterväggar med liten belastning av markfukt kan tilläggsisolering göras invändigt. Av säkerhetsskäl kan man använda ett s k fristående regelverk, där reglarna inte är i direkt kontakt med den befintliga väggen.
3. I första hand bör man, för att undvika fuktskador, begränsa isolertjockleken. Då tilläggsisoleringen är relativt tunn och utförd av mineralull kan ångspärren troligen med fördel undvaras.
4. Om kraftig invändig isolering av mineralull görs kan det vara mest fördelaktigt att använda ny ångspärr. Det finns små möjligheter till uttorkning inåt om temperaturfallet över isoleringen är stort. Det måste emellertid starkt poängteras att detta alternativ förutsätter en vägg som i stort sett är fri från markfukt.

Det skulle under vissa förutsättningar kunna finnas risk för diffusion från en fuktig källarvägg och kondensation mot en ångspärr som sitter innanför tilläggsisoleringen. Om stark solstrålning förekommer mot den del av väggen som är ovanför mark, och temperaturen i själva källaren är låg kan temperaturförhållandena bli sådana att detta kan inträffa. Detta kan vara ett argument mot ångspärren om källaren är tidvis ouppvärmad.

4.5 KONDENSATION VID GAMMAL ÅNGSPÄRR

I de icke stationära beräkningarna har fallet att befintlig konstruktion har en invändig ångspärr, avsiktlig eller oavsiktlig, inte behandlats. FIG 4.35 visar schematiskt situationen vid invändig tilläggsisolering av konstruktion med gammal ångspärr. Tilläggsisoleringen antas inte ha någon ny ångspärr.

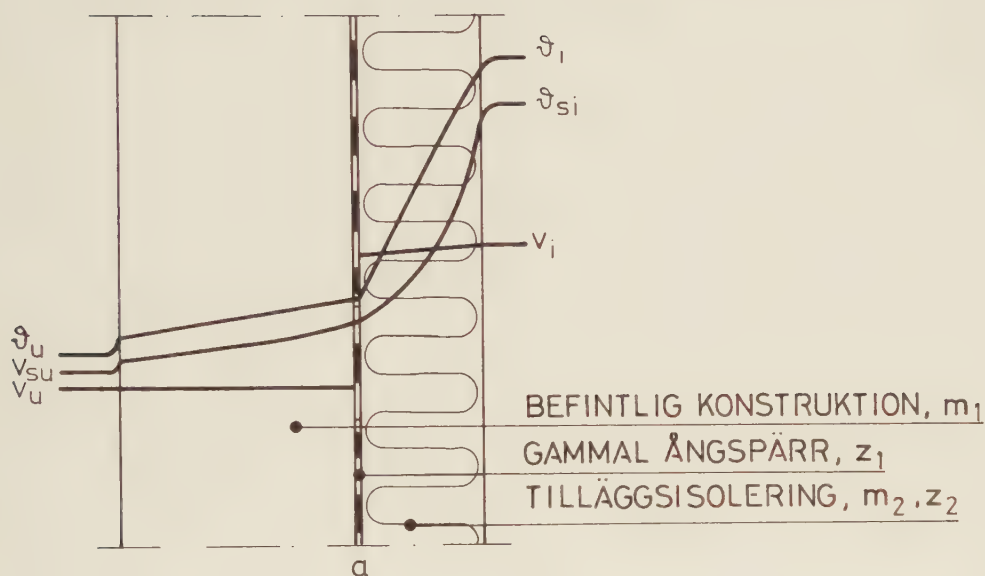


FIG 4.35. Schematiska temperatur- och ånghaltsförhållanden vid invändig tilläggsisolering av konstruktion med gammal ångspärr. Stationära förhållanden.

Problemet behandlas i fortsättningen stationärt och utan hänsyn till materialens fuktkapacitet. Detta motiveras av att kondensation kan ske relativt snabbt mot ångspärren eftersom dess ånggenomgångsmotstånd är så stort att diffusion in i väggen knappast kan förekomma. Tilläggsisoleringen kan antas sakna fuktkapacitet.

Den gamla konstruktionen har värmemotståndet m_1 . Den gamla ångspärren har försumbart värmemotstånd och ånggenomgångsmotståndet z_1 . I z_1 kan även räknas in i ånggenomgångsmotståndet för den gamla konstruktionen, om det är stort. Tilläggsisoleringen har värmemotståndet m_2 och ånggenomgångsmotståndet z_2 (inklusive eventuellt ytskikt).

Om det blir kondensation kommer denna med säkerhet att inträffa vid den gamla ångspärren. Anghalten här, v_a , kan skrivas

$$v_a = v_i - \frac{z_2}{z_1 + z_2} (v_i - v_u)$$

där v_i och v_u är inne- respektive uteanghalten.

Temperaturen vid den gamla ångspärren, ϑ_a , blir

$$\vartheta_a = \vartheta_i - \frac{m_i + m_2}{m_i + m_1 + m_2 + m_u} (\vartheta_i - \vartheta_u)$$

där m_i och m_u är övergångsmotstånd och ϑ_i och ϑ_u är inne- respektive ute-temperaturen.

Villkoret för att kondensation vid ångspärren inte skall inträffa är

$$v_a < v_s(\vartheta_a)$$

där $v_s(\vartheta_a)$ betecknar mättnadsånghalten vid temperaturen ϑ_a .

En vanlig situation är att man vill bedöma hur stort värmemotstånd en tilläggsisolering får ha utan risk för kondensation vid den gamla ångspärren. Detta kan beräknas ur de angivna ekvationerna. Om isoleringens ånggenomgångsmotstånd inte är försumbart, får passningsräkning göras, eftersom ånggenomgångsmotståndet z_2 är beroende av skiktjockleken.

FIG 4.36 visar en sådan beräkning vid ett konstant ute- och inneklimat. I diagrammet finns två kurvskaror som motsvarar villkoren att relativa luftfuktigheten vid ångspärren inte får bli högre än 99 respektive 90%.

I diagrammet kan man gå in med förhållandet mellan ånggenomgångsmotstånden hos den gamla och den nya konstruktionen, upp till linjen för tillåten relativ fuktighet och den gamla konstruktionens värmemotstånd. På den ver-

tikala axeln avläses tillåtet värmemotstånd för tilläggsisoleringen. Det intressanta fallet är när z_2/z_1 är lika med noll, det vill säga att den nya konstruktionens ånggenomgångsmotstånd är försumbart i jämförelse med den gamla ångspärrens. I detta fall ger FIG 4.36 att m_2 kan vara ungefär lika med, eller något större än m_1 om villkoret är att just undvika kondensation. Om isoleringen görs med ny ångspärr, det vill säga z_2/z_1 är ungefär lika med 1, ger diagrammet att tillåtet värmemotstånd hos tilläggsisoleringen visserligen ökar, men det får inte vara hur stort som helst. Detta skulle vara sant om man hade stationära förhållanden under oändligt lång tid. I verkligheten tar det emellertid så lång tid för vattenånga att passera ett skikt med stort ånggenomgångsmotstånd, att någon vattenansamling inte hinner ske.

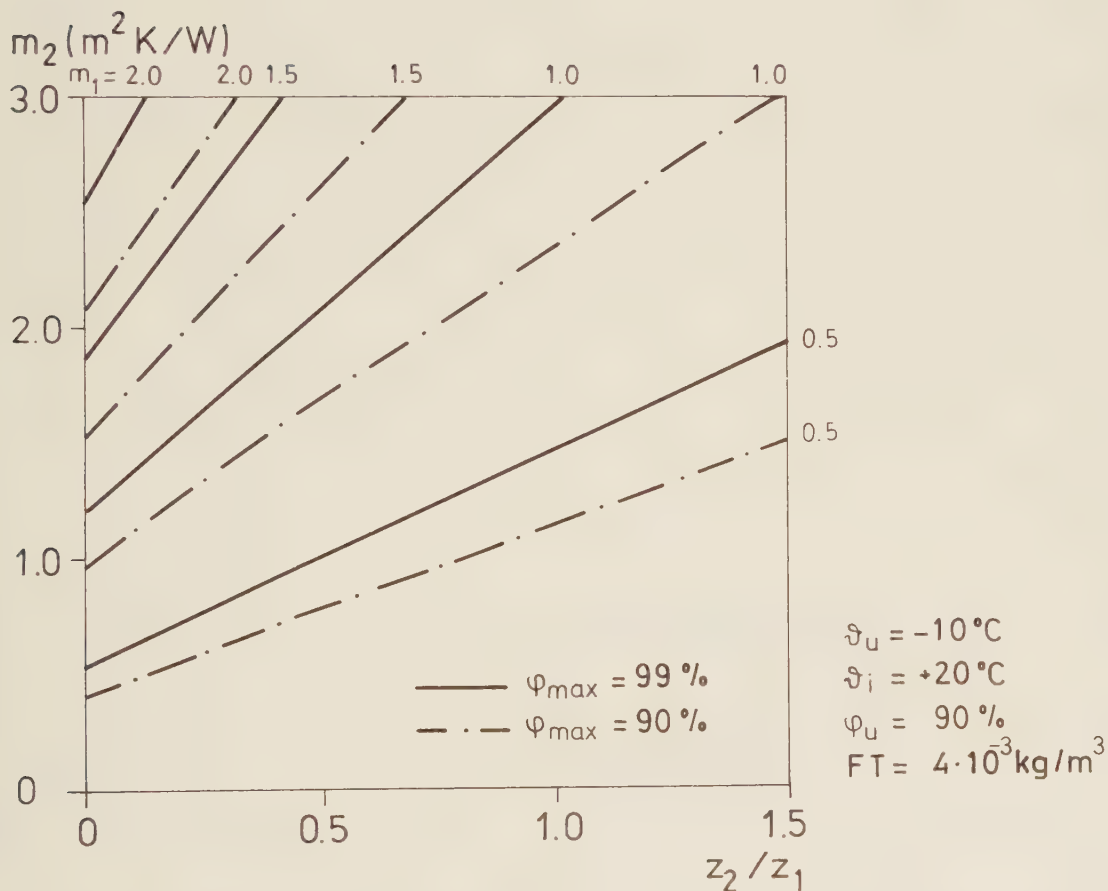


FIG 4.36. Tillåtet värmemotstånd vid invändig tilläggsisolering av konstruktion med gammal ångspärr.

FIG 4.37 visar beräkningar för utomhusklimat i Skåne och Norrland. I dessa beräkningar har satts som villkor att maximalt tillåtna relativa fuktigheten, $\phi_{\max}$, inte får överskridas under den mest kritiska månaden under året. Månadsmedelvärden för lufttemperatur och relativ luftfuktighet under normalåret 1931-60 har använts. Inneklimatet har satts till $+20^{\circ}\text{C}$, fukttillskott $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Kurvor för $\phi_{\max}$ lika med 99 respektive 90% visas.

Valet av uteklimat kan givetvis diskuteras. Att använda månadsmedelvärden kan motiveras med att tillfällig kondensation inte nödvändigtvis behöver orsaka skador.

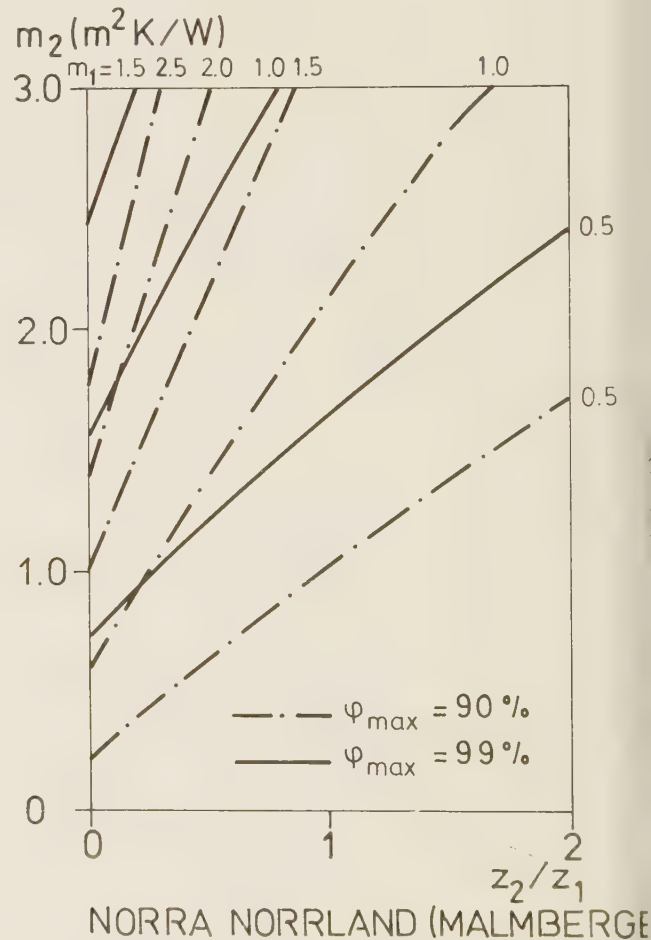
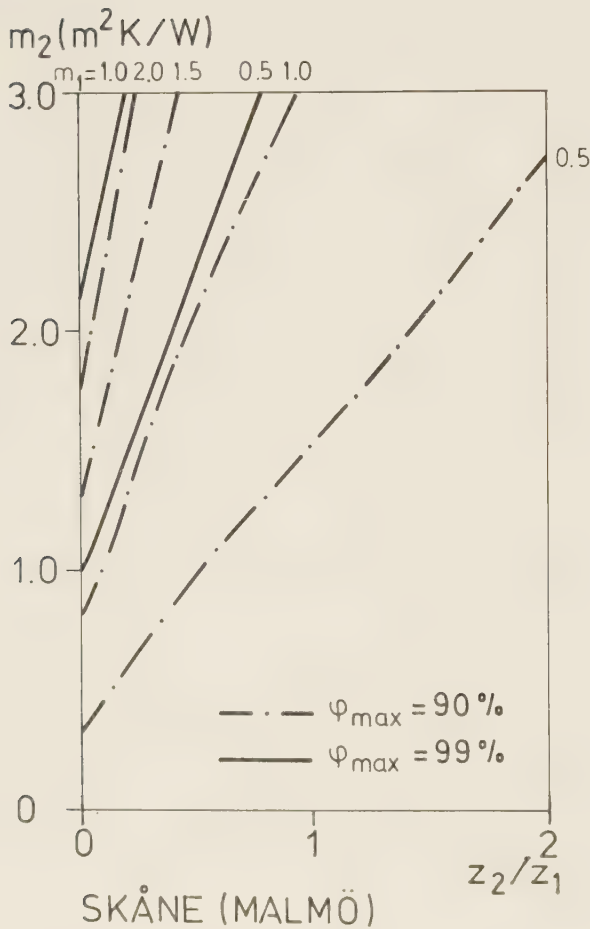


FIG 4.37. Exempel på beräkning av tillåtet värmemotstånd vid invändig tilläggsisolering av konstruktion med gammal ångspärr invändigt. Ute-klimat: månadsmedelvärden 1931-60. Inneklimat: $+20^{\circ}\text{C}$, $FT = 3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

Dimensionerande månad i beräkningarna i FIG 4.37 ligger i allmänhet på hösten, eftersom relativa fuktigheten inomhus blir hög då, samtidigt som utetemperaturen börjat sjunka.

Om man försummar värmeövergångsmotstånden, m_i och m_u , vid beräkning av temperaturen ϑ_a vid ångspärren blir temperaturen en funktion av förhållandet mellan m_2 och m_1 . Detta innebär att man enkelt kan göra beräkningar för ett stort antal fall samtidigt. Felet i approximationen blir litet om m_2 är stort. FIG 4.38 visar approximationens inverkan på ϑ_a för olika värden på m_1 och m_2 . Ute- och innetemperatur har satts till 0°C respektive 20°C . Approximationen ger i allmänhet värden på osäkra sidan, det vill säga något för högt ϑ_a .

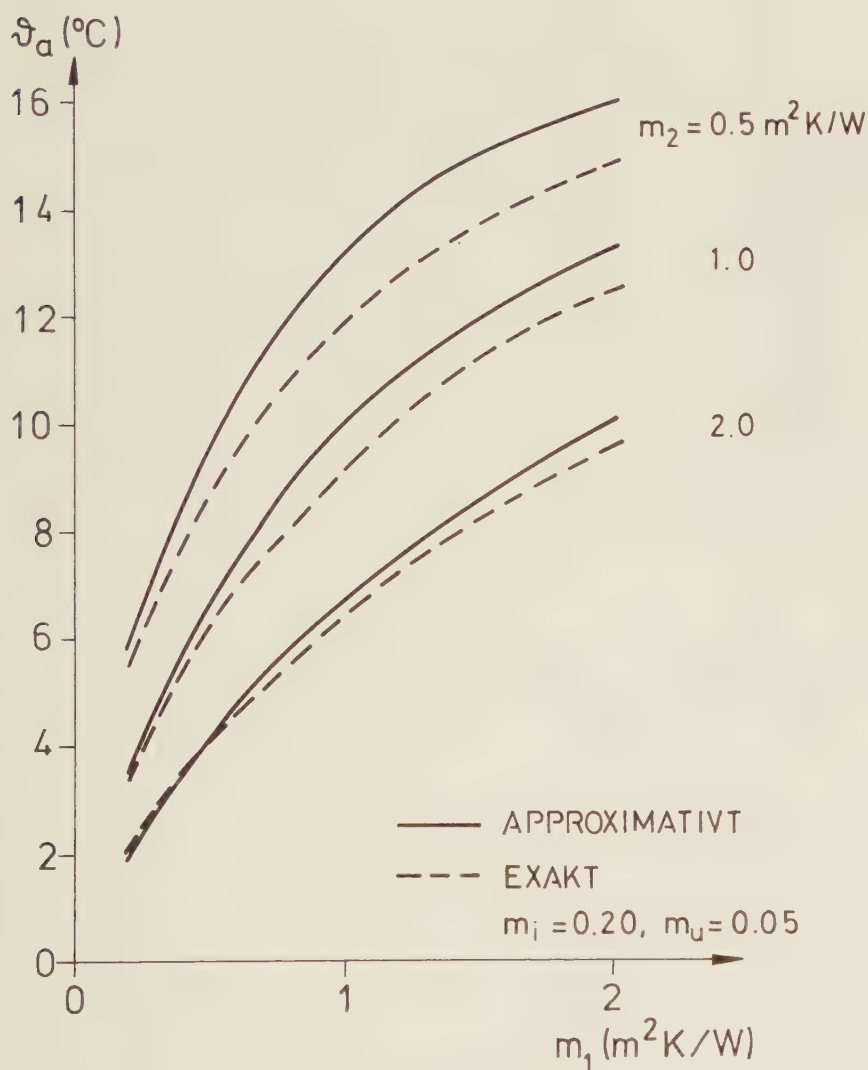


FIG 4.38. Temperatur vid gammal ångspärr. Beräkning med och utan hänsyn till värmeövergångsmotstånden.

I FIG 4.39 visas approximativa beräkningar vid olika fukttillskott inomhus för tre klimatområden, representerade av Malmö, Västerås och Malmberget. För uteklimatet har samma förutsättningar valts som vid beräkningarna i FIG 4.37.

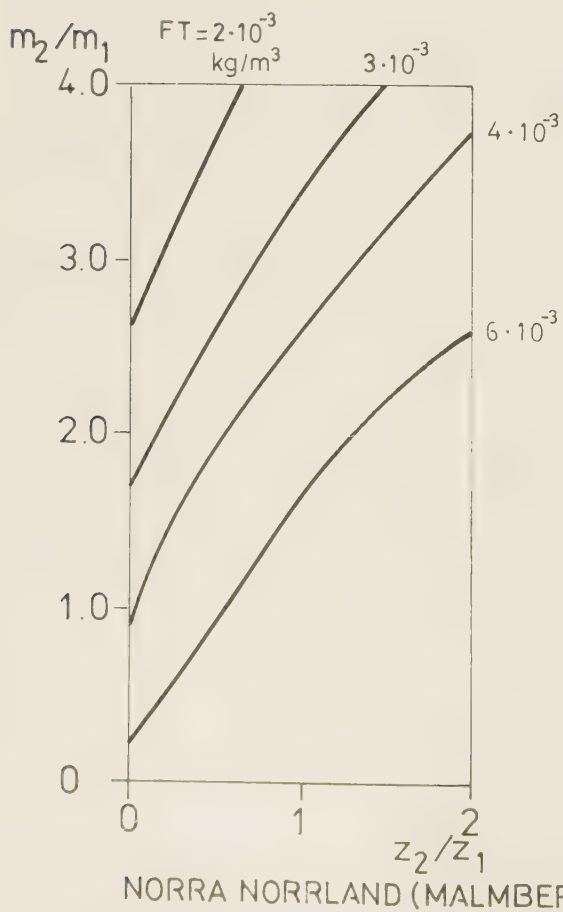
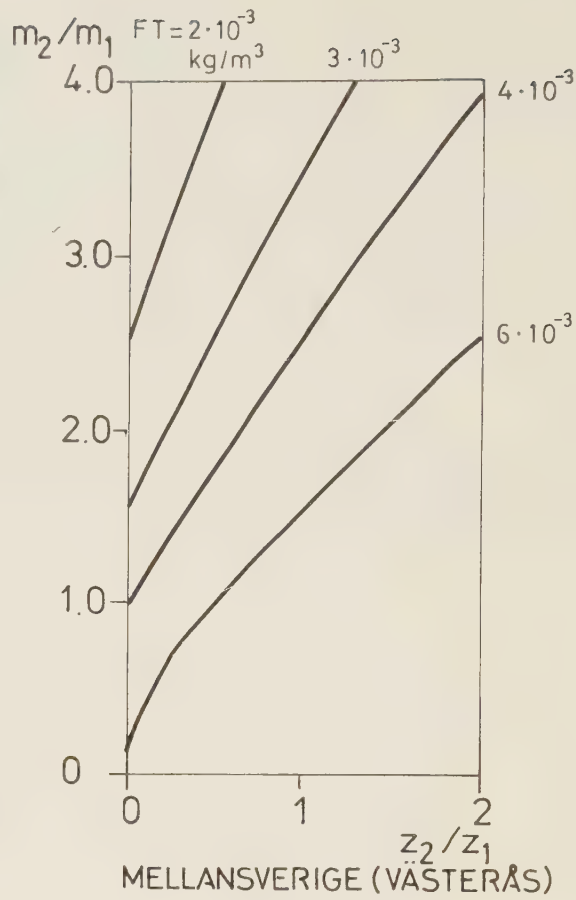
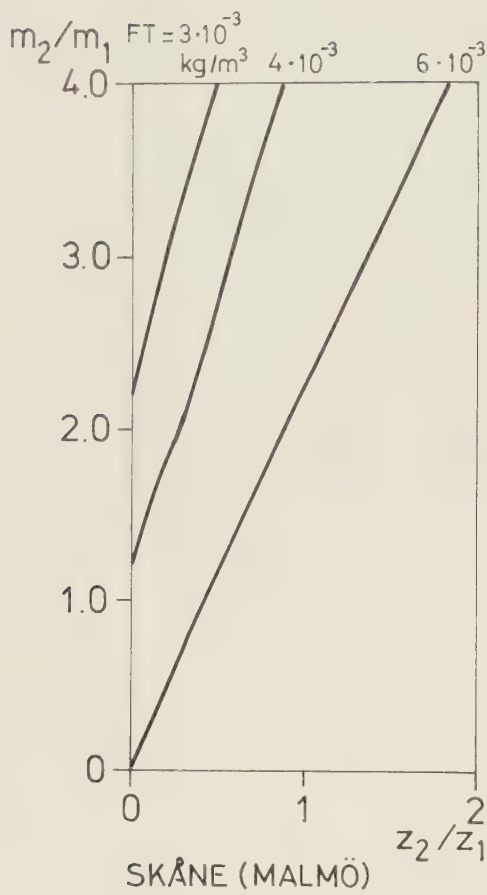


FIG 4.39. Tillåtet värmemotstånd vid invändig tilläggsisolering av konstruktion med gammal ångspärr. Approximativ beräkning med värmeövergångsmotstånderna försummade.

I den föregående diskussionen har förutsatts endimensionellt värme flöde. Köldbryggor påverkar temperaturfördelningen. I allmänhet är det så att bakom en invändig isolering har man högre temperatur vid köldbryggan än mitt på väggen. Undantag från detta är ytterväggshörn, där temperaturen bakom isoleringen sjunker i hörnet.

Detta visas i FIG 4.46 där isotermer i ett ytterväggshörn i $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg ritats upp, utan tilläggsisolering samt med 5 cm invändig isolering.

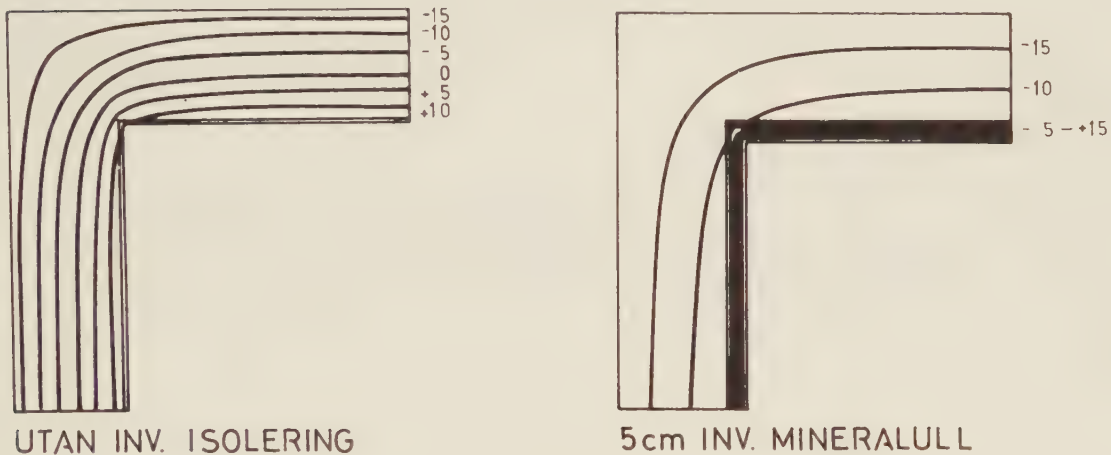


FIG 4.40. Temperaturförhållanden vid oisolerat och invändigt isolerat ytterväggshörn i $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg. $\vartheta_u = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_i = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Temperaturen bakom isoleringen i ytterväggshörnet kan direkt jämföras med temperaturen längre ut på väggen i FIG 4.41, där tre fall med olika invändig isolertjocklek ritats upp för samma ytterväggshörn som ovan. Inne- och utetemperatur är $+20$ respektive $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Av figuren framgår att vid 5 cm invändig isolering är temperaturen bakom isoleringen i ytterväggshörnet lika låg som vid 10 cm invändig isolering mitt på väggen. Detta har givetvis mycket stor betydelse för kondensationsrisken.

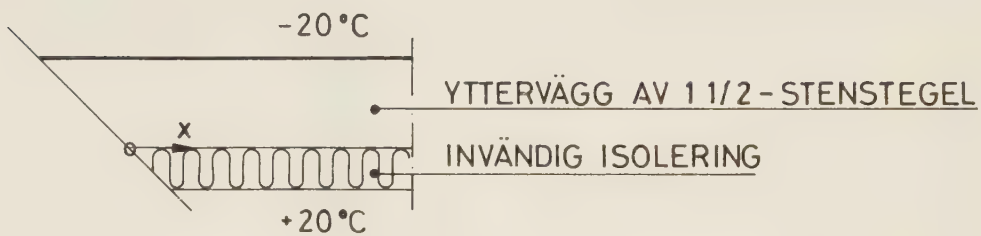
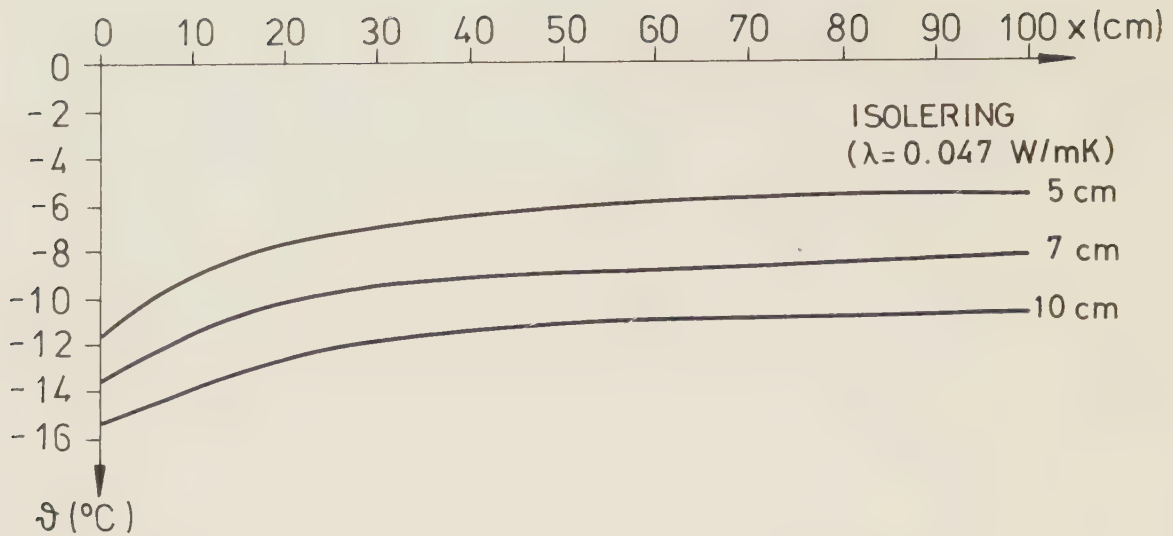


FIG 4.41. Temperaturfördelning i närheten av ytterväggshörn bakom invändig tilläggsisolering.

Försök har gjorts att beräkna temperaturen i ett ytterväggshörn bakom en invändig isolering med ett approximativt uttryck. Ett uttryck som ger relativt god överensstämmelse med gjorda datorberäkningar är

$$\theta_A = \theta_i - \frac{m_i + m_{\text{isol}}}{m_i + m_{\text{isol}} + 0,5(m_u + m_{\text{bef}})} (\theta_i - \theta_u)$$

Beteckningarna definieras i FIG 4.42.

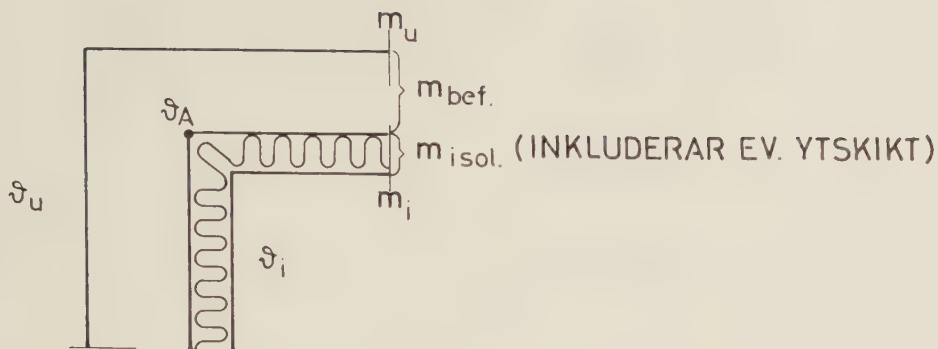
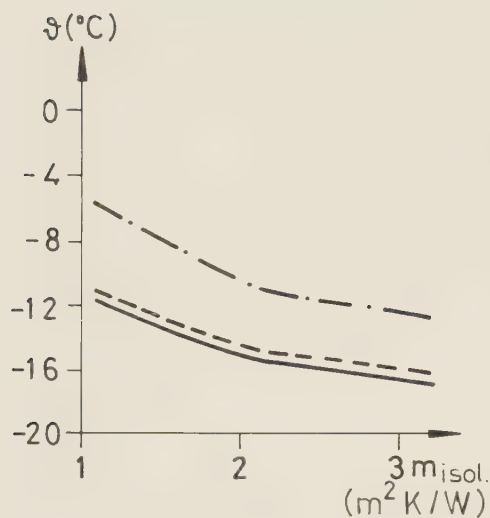
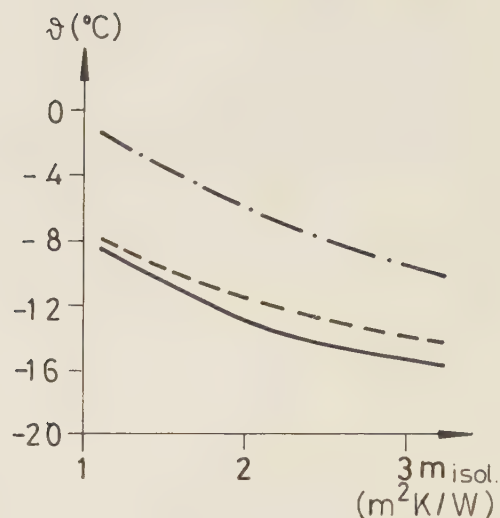


FIG 4.42. Beteckningar i approximativt uttryck för temperatur i ytterväggshörn bakom tilläggsisolering.

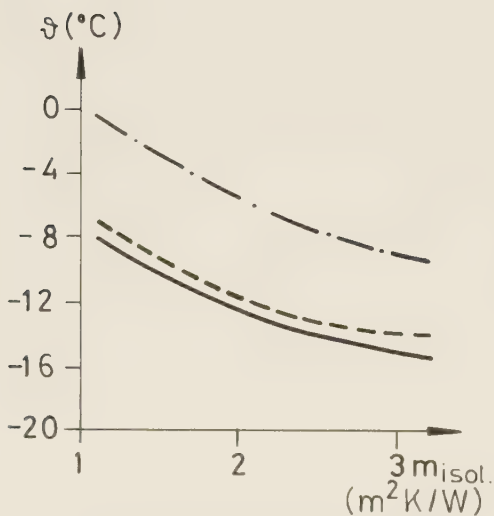
I FIG 4.43 jämförs det approximativa uttrycket med resultat från datorberäkningar gjorda för väggtyperna A, B, C och D, beskrivna i KAP 2. Temperaturen långt från ytterväggshörnet, den endimensionella temperaturen mellan tilläggsisoleringen och den befintliga väggen har också lagts in i figuren. Temperaturskillnaden över väggen är, som i datorberäkningarna 40°C .



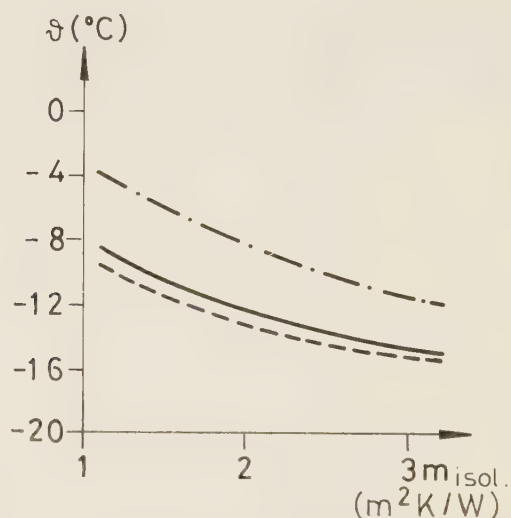
1 1/2-STENS TEGELVÄGG
(VÄGGTYP A)



1-STENS TEGELVÄGG MED
5cm TRÄULLSPLOTTA INVÄNDIGT
(VÄGGTYP B)



250 mm GASBETONGVÄGG
(VÄGGTYP C)



UTVÄNDIGT GASBETONGISOLERAD
BETONGVÄGG
(VÄGGTYP D)

—— DATORBERÄKNAT
---- APPROXIMATIVT UTTRYCK
-.-.- ENDIMENSIONELLT BERÄKNAD TEMPERATUR

FIG 4.43. Temperatur i ytterväggshörn bakom invändig tilläggsisolering med värmemotståndet m_{isol} . Jämförelse mellan approximativt uttryck och datorberäkningar. $\vartheta_i = +20^\circ\text{C}$, $\vartheta_u = -20^\circ\text{C}$.

För de tre första väggtyperna ger det approximativa uttrycket högre temperatur än datorberäkningarna. Överensstämmelsen är sämst för väggtyp B, max ca $1,5^{\circ}\text{C}$ eller ca 4% av temperaturskillnaden över väggen. Detta kan förklaras av att materialet närmast värmeisoleringen, 5 cm träullsplatta, har ganska hög värmeisoleringsförmåga.

För väggtyp D, 15 cm betong utvändigt isolerad med 10 cm gasbetong, ger datorberäkningarna högre temperatur än det approximativa uttrycket. Detta kan förklaras av att materialet intill isoleringen har hög värmeledningsförmåga, så att tvärledningen mellan väggens olika delar är stor.

Uttrycket bör kunna användas för praktiska beräkningar av kondensationrisk i ytterväggshörn då ingående material har värmeledningstal inom området mellan gasbetong och betong. Man kan också enkelt ta hänsyn till att övergångsförhållandena i ett hörn avviker från förhållandena mitt på en yttervägg.

Då ny ångspärr används vid tilläggsisoleringen kan en beräkning vid stationära förhållanden ge risk för kondensation. I praktiken kan denna risk uteslutas. För att illustrera detta har gjorts beräkningar av maximalt möjlig kondenserad mängd vid olika värden på ånggenomgångsmotståndet hos den gamla och den nya ångspärren, z_1 och z_2 .

I beräkningen har antagits stationära förhållanden, där temperaturen och relativa luftfuktigheten ute är medeltalen under perioden oktober - mars baserade på normalåret 1931 - 60 i Malmö. Inneklimatet är 20°C , fukttillskott $4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Att göra på detta sätt är en förenkling eftersom mättnadsånghalten är en olinjär funktion av temperaturen. Felet blir dock ganska litet.

Utgångskonstruktionen har värmemotståndet $m_1 = 0,63$ ($1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg). Väggen har antagits invändigt isolerad med ett isoleringsmaterial med $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$. Isolertjockleken har varierats. Temperaturfördelningen har förutsatts vara endimensionell.

FIG 4.44 visar maximalt kondenserbar mängd under denna tid för olika värden på gamla och nya ångspärrens ånggenomgångsmotstånd, z_1 och z_2 . z_2 har för de beräknade fallen valts ganska litet. Man ser ändå att kondensmängden blir liten då z_2 ökar. En beräkning för samma förhållanden med $z_1 = z_2 = 2000 \cdot 10^3 \text{ s/m}$ ger $G_{\text{kond}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ på ett halvt år.

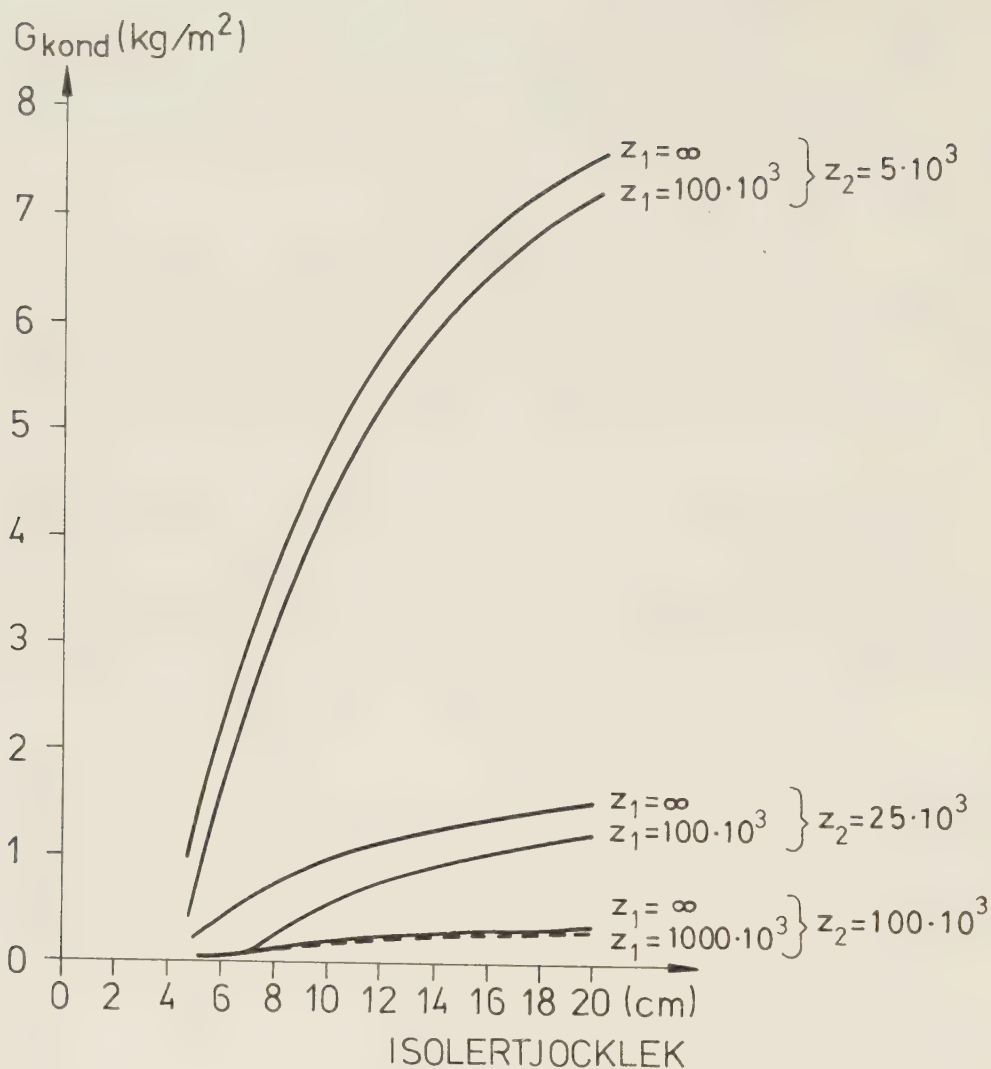


FIG 4.44. Kondenserad mängd under vinterhalvåret, Malmö, vid olika ånggenomgångsmotstånd hos ny och gammal ångspärr, som funktion av invändig isolertjocklek på $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg. $\vartheta_i = 20^\circ\text{C}$, fukttillskott $4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Stationära förhållanden.

4.6 KONDENSATION I ELLEDNINGAR

I många fall måste man, vid invändig tilläggsisolering, ansluta nya elurtag och dosor till elsystemet i den befintliga ytterväggen. En sådan anslutning visas schematiskt i FIG 4.45.

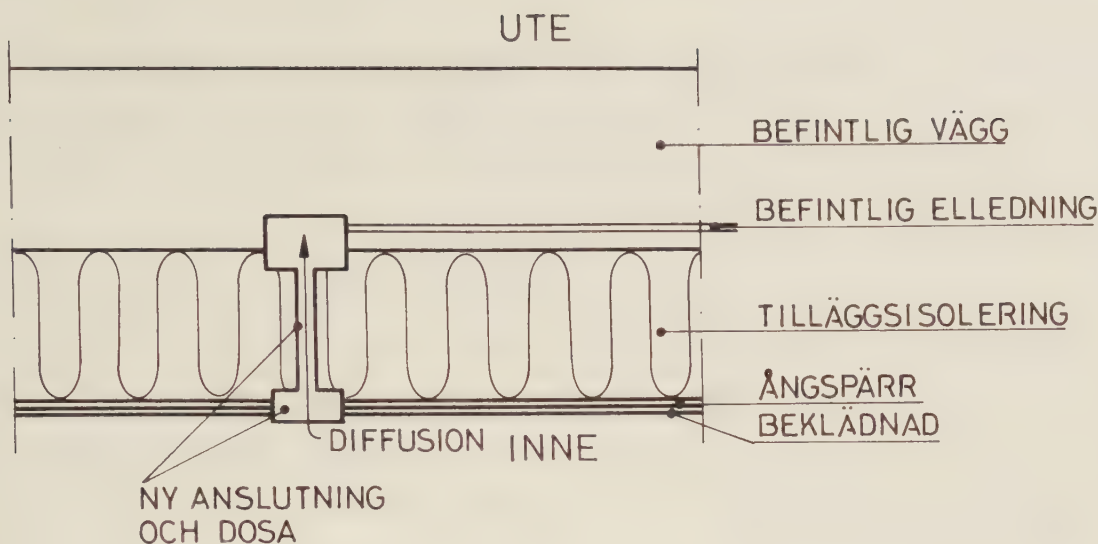


FIG 4.45. Schematisk figur av anslutning till befintliga elledningar vid invändig tilläggsisolering.

Det finns i allmänhet ingenting som hindrar passagen av vattenånga från inneluften till den gamla ledningen. Den gamla ledningen kan betraktas som ångtät, varför ånghalten här blir lika med inneånghalten. Om temperaturen i den gamla väggen, det vill säga i den gamla ledningen, är lägre än rumsluftens mättnadstemperatur kondenserar vattenångan i ledningen, vilket kan vara en säkerhetsrisk om ledningens elektriska isolering av någon anledning är skadad.

Kondensationsrisken kan överslagsmässigt bedömas med samma metod som i KAP 4.5. Eftersom konsekvenserna av eventuell kondensation kan vara allvarliga är det lämpligt att välja stränga randvillkor vid en sådan överslagsmässig beräkning. Om kondensationsrisk finns bör anslutningen inte göras på detta sätt.

Som exempel kan nämnas att en befintlig vägg med värmemotståndet $m_1 = 0,63$ (motsvarar $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg) endast får tilläggsisoleras invändigt med 2 cm mineralull ($\lambda = 0,04$ W/mK) om kondensation skall undvikas i elledningen vid uteklimatet -20°C , 80% RF och inneklimatet $+20^\circ\text{C}$, fukt-tillskott $4 \cdot 10^{-3}$ kg/m³. Ledningen har då förutsatts ligga i gränsskiktet mellan befintlig vägg och isolering och z_2/z_1 , enligt tidigare, har satts lika med noll.

4.7 FÖRENKLAD UPPSKATTNING AV ÅRLIG FUKTBALANS

Ett kriterium för att eventuell kondensation inte skall anses vara skadlig är att den mängd som kondenserat under vintern skall kunna torka ut helt och hållet under sommaren. Fukthalten i konstruktionen får inte öka år från år.

Om materialen antas ickehygroroskopiska och kapillärtransport inte antas förekomma inträffar kondensation beräkningsmässigt i en väldefinierad zon. För en invändigt mineralulls isolerad vägg ligger kondensationszonen alltid i gränsskiktet mellan mineralull och utanförliggande material, om detta har jämförelsevis liten ånggenomsläpplighet. Totalt kondenserad mängd under året blir

$$G_1 = \int_{t_1}^{t_2} \left[(v_i - v_{sk})/z_2 - (v_{sk} - v_u)/z_1 \right] dt$$

v_i = ånghalten inomhus (kg/m^3)

v_u = ånghalten utomhus (kg/m^3)

v_{sk} = mättnadsånghalten i kondensationszonen (kg/m^3)

z_1 = ånggenomgångsmotståndet utanför kondensationszonen (s/m)

z_2 = ånggenomgångsmotståndet innanför kondensationszonen (s/m)

t_1, t_2 = tidpunkterna för kondensationens början och slut.

Om man antar att uttorkningen sker från kondensationszonen, när det inte längre finns förutsättningar för kondensation, kan totalt uttorkad mängd under året skrivas som

$$G_2 = \int_{t_2}^{t_1} \left[(v_{sk} - v_i)/z_2 + (v_{sk} - v_u)/z_1 \right] dt$$

Om G_2 är större än eller lika med G_1 är den årliga fuktbalansen negativ, det vill säga hela kondensmängden kan inte torka ut.

Några beräkningar har gjorts av den på detta sätt uppskattade årliga fuktbalansen för ett par typkonstruktioner. Månadsmedelvärden har använts för uteklimatet, och den kondenserade, respektive uttorkade fuktmängden har

summerats över hela året.

FIG 4.46 visar maximalt kondenserad respektive uttorkad fuktmängd under olika månader i Skåneklimat, normalåret 1931 - 60. Den aktuella konstruktionens data har valts så att de motsvarar en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg, invändigt isolerad med 10 cm mineralull utan ångspärr. Solstrålning mot väggen antas inte förekomma. Fukttillskottet inomhus har antagits vara konstant under hela året.

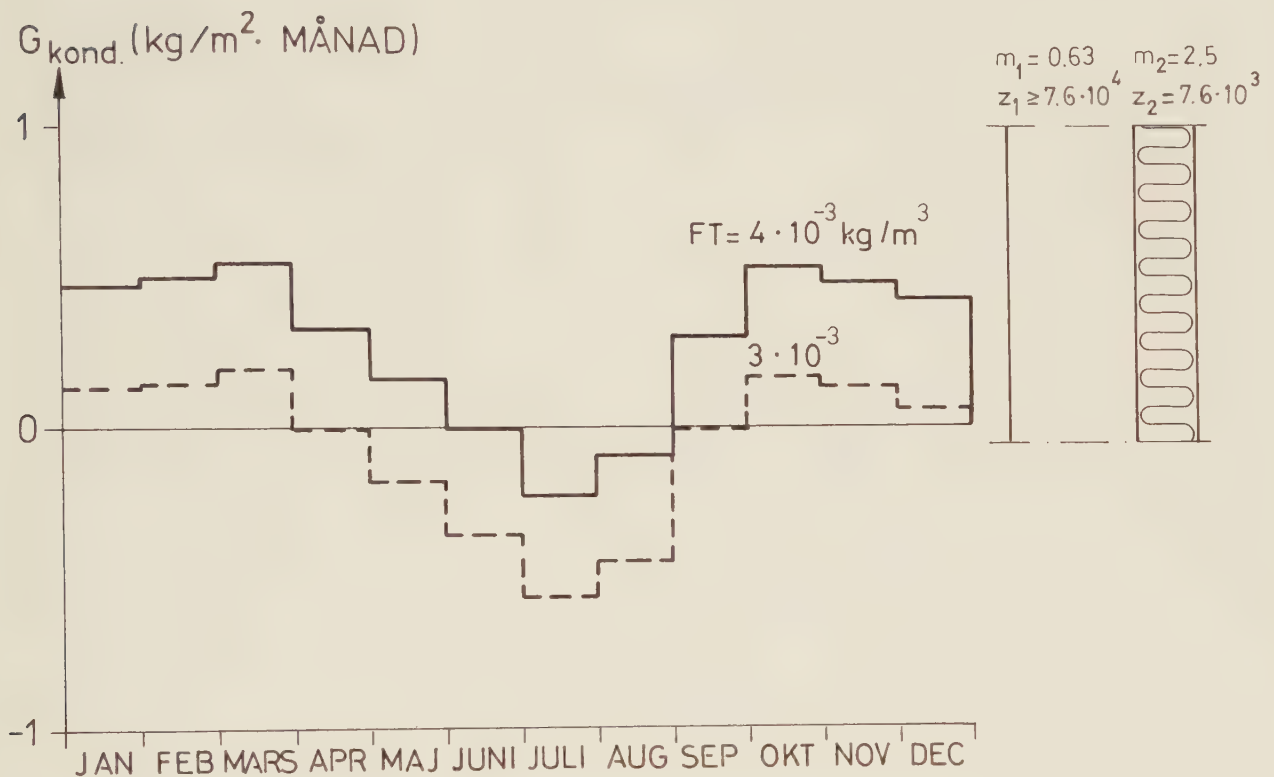


FIG 4.46. Beräkning av maximalt möjlig kondenserad respektive uttorkad mängd under olika månader för $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg, invändigt isolerad med 10 cm mineralull. Månadsmedelvärden för Skåne (Malmö), $\vartheta_i = 20^\circ \text{C}$.

En jämförelse med datorberäkningar av samma fall, FIG 4.17, ger god överensstämmelse med avseende på rent kvalitativa resultat. Fallet med invändigt fukttillskottlika med 3 g/m^3 har en positiv fuktbalans. Kondensations-

perioden har i TAB 4.4 uppskattats till $1/10 - 1/3$, vilket också stämmer ganska bra med FIG 4.46. Då fukttillskottet inomhus är 4 g/m^3 är fuktbalansen negativ. Skillnaden mellan maximalt kondenserad och maximalt uttorkad mängd är $3,4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{år}$, eller ca $8,9 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{år}$. I TAB 4.5 visas resultatet för några andra fall, alla avseende en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg.

TABELL 4.5. Uppskattning av årlig fuktbalans med förenklad metod. $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg med invändig mineralullsisolering utan ångspärr. Beteckningar enligt FIG 4.54. Positivt värde på G betyder negativ fuktbalans.

Uteklimat	Fukttillskott inne (kg/m^3)	m_1 ($\text{m}^2\text{K/W}$)	m_2 ($\text{m}^2\text{K/W}$)	z_1 (s/m)	z_2 (s/m)	$G_{\text{tot}} = G_1 - G_2$ ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{år}$)
Skåne, utan strålning	$3 \cdot 10^{-3}$	0,63	2,5	$76 \cdot 10^3$	$7,6 \cdot 10^3$	-0,8
Skåne, utan strålning	$4 \cdot 10^{-3}$	0,63	2,5	$76 \cdot 10^3$	$7,6 \cdot 10^3$	3,4
Skåne, utan strålning	$3 \cdot 10^{-3}$	0,63	2,5	"	$7,6 \cdot 10^3$	0,4
Skåne, utan strålning	$4 \cdot 10^{-3}$	0,63	2,5	"	$7,6 \cdot 10^3$	4,6
Skåne, utan strålning	$4 \cdot 10^{-3}$	0,63	1,25*	$76 \cdot 10^3$	$5,9 \cdot 10^3$ *	-0,05
Skåne, utan strålning	$4 \cdot 10^{-3}$	0,63	1,25*	"	$5,9 \cdot 10^3$ *	1,5
Skåne, strålning mot s-vägg**	$4 \cdot 10^{-3}$	0,63	2,5	$76 \cdot 10^3$	$7,6 \cdot 10^3$	-7,7
Skåne, strålning mot s-vägg**	$4 \cdot 10^{-3}$	0,63	2,5	"	$7,6 \cdot 10^3$	-5,5
Norrland, utan strålning	$3 \cdot 10^{-3}$	0,63	2,5	$76 \cdot 10^3$	$7,6 \cdot 10^3$	2,8
Norrland, utan strålning	$4 \cdot 10^{-3}$	0,63	2,5	$76 \cdot 10^3$	$7,6 \cdot 10^3$	7,0

* Avser invändig isolering med 5 cm mineralull

** Ekvivalent utetemperatur beräknad för varje månad med hänsyn till
genomsnittlig molnighet och intensitet av kortvägig strålning.

a = 0.7

Det beskrivna förfarandet är grovt jämfört med en datorberäkning. Kondenserade och uttorkade fuktmängder överskattas. Det kan emellertid användas då materialskikten har liten fuktkapacitet, för att uppskatta maximalt möjliga kondensmängder och möjlighet till uttorkning av dessa.

5 EXPERIMENTELLA UNDERSÖKNINGAR

5.1 ALLMÄNT

Laboratorieförsök har gjorts för att studera inverkan av invändig tilläggsisolering på fukt- och temperaturförhållanden i ytterväggar. De väggtyper som undersökts har varit $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg och 250 mm murad gasbetongvägg. I laboratorieväggen har lagts in köldbryggor: bjälklagsanslutning, innerväggsanslutning och fönstersmygar. Temperaturförhållandena i dessa har mätts vid stationära förhållanden och vissa jämförelser har gjorts med datorberäkningar.

Kondensation i elledning, vid fönstersmygar och mot gammal ångspärr har i viss mån undersökts.

När det gäller fuktförhållandena har avsikten varit att endast studera diffusion av luftfukt från varma sidan.

Tilläggsisoleringen har i alla försöken utgjorts av mineralull med beklädnad av porös träfiberskiva utan ångspärr. Denna begränsning har gjorts eftersom fukthaltsändringarna i speciellt gasbetongväggen sker mycket långsamt. Mineralull är också det vanligaste isoleringsmaterialet för ytterväggar. De fuktproblem som kan fås vid invändig isolering med cellplast hänger troligen samman med fuktkonvektion och springor i isoleringsskiktet och studeras säkert bättre på annat sätt.

5.2 BESKRIVNING AV PROVVÄGG OCH FÖRSÖKSUPPLÄGGNING

En laboratorievägg, innehållande två olika väggtyper, har byggts upp mellan ett klimatrum och ett frysrum. Väggen har byggts i två våningar, avskilda från varandra av ett betongbjälklag vilket ansluter till båda väggtyperna enligt FIG 5.1.

I fönsteröppningarna har satts in fiktiva fönster, bestående av två tunna hårda träfiberskivor med luftmellanrum och 10 cm bred träkarm placerad centriskt i smygen.

Tegelväggen har murats av massivt tegel, densitet ca 1900 kg/m^3 . Gasbetongen är 250 mm murblock, densitet 500 kg/m^3 . Väggen har slammats på

båda sidor med KC-bruk, vilket också använts vid murningen.

Vinkelrätt mot tegelväggen på varma sidan har murats en 1-stens tegelvägg. Denna simulerar en bärande innervägg. Betongbjälklaget är 16 cm tjockt och upplaget i väggen är 12 cm.

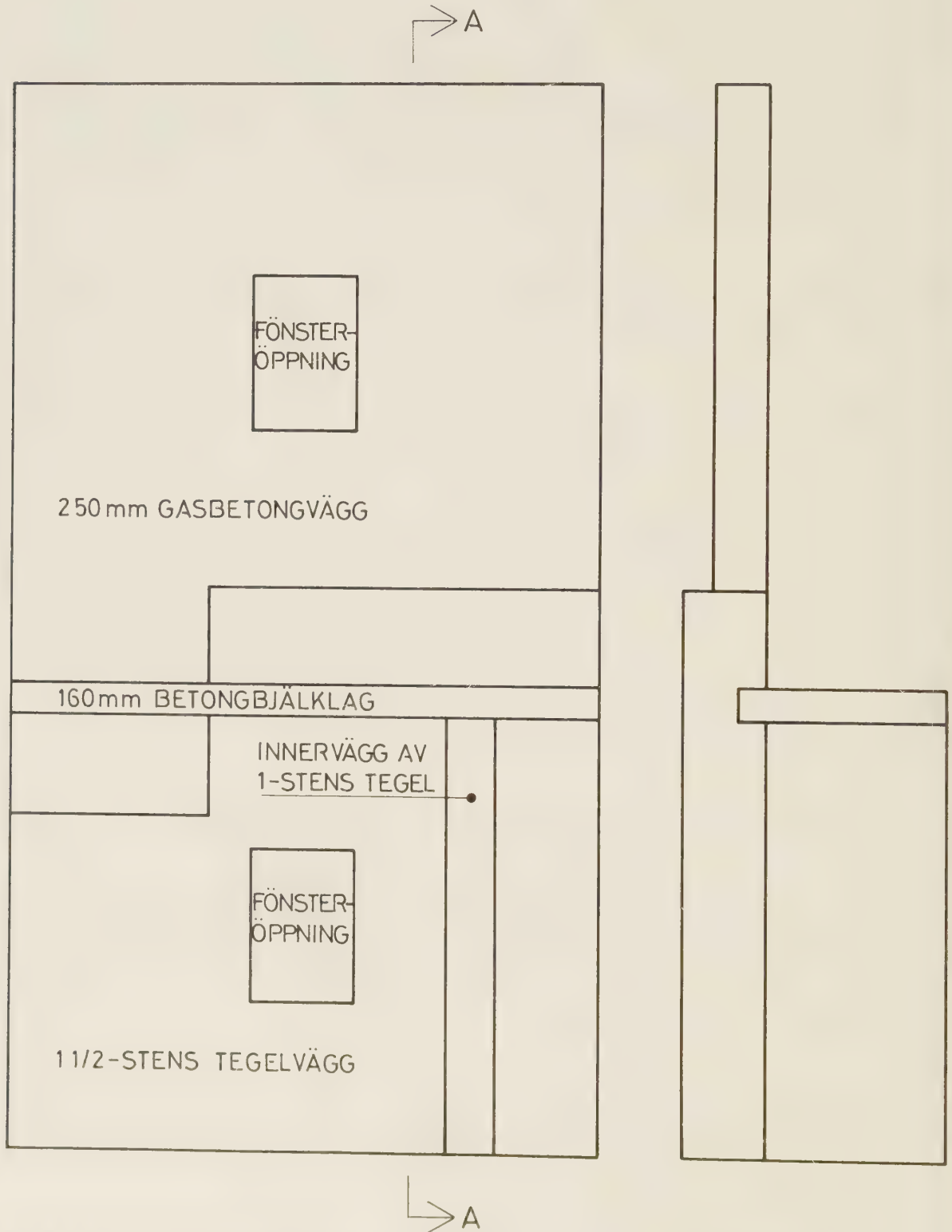


FIG 5.1. Provvägg.

Temperaturmätningarna har gjorts med termoelement, inlagda i fogarna.

Temperaturfördelningar har mätts på ställen som bedömts ostörda av två- eller tredimensionella effekter. Väggens begränsade yta medför emellertid att sådana effekter i alla fall troligen förekommer, åtminstone då väggen är invändigt isolerad. Av denna anledning har det inte ansetts speciellt meningsfullt att medelvärdesbilda resultat från olika mätpunkter. Tillgänglig registreringskapacitet har också hindrat detta förfarande.

Mätpunkter har också lagts in vid de två fönsteröppningarna, vid bjälklagsanslutningarna till tegelväggen och till gasbetongväggen samt vid anslutningen till innerväggen. Mätpunkternas placering framgår av resultatredovisningen. Temperaturerna har registrerats på en datalogg var 20:e minut under 3 - 4 timmar. Medelvärdesbildning och kontroll av standardavvikelsen har sedan gjorts.

För att få en snabb uttorkning av byggfukten i väggen lades en värmekabel in i fogarna vid varje skift i gasbetongväggen och vart tredje i tegelväggen. Värmekabeln var dimensionerad för att ge temperaturen ca 70 - 90 °C inne i väggarna. En slinga lades också i betongbjälklaget.

På den del av provväggen som består av gasbetong placerades en fingerad eldosa av plåt. Denna anslöts genom isoleringen via ett böjligt plaströr till en dosa på isoleringens insida.

Några fält på provväggen målades med oljefärg, alkydfärg och plastfärg. Ett fält täcktes också med plastfolie på tilläggsisoleringens kalla sida.

Mätningar av fuktinnehållet i väggen har gjorts med elektriska fuktgivare, utvecklade vid avdelningen för Byggnadsmateriallära, LTH, vilka lagts in i bruket i fogarna. Fuktgivarna består av en rak och en spiralformad elektrod av koppar, skilda från varandra genom ett autoklaverat cementbruk. Noggrannheten är inte särskilt god och givarna bör endast användas för att studera relativa ändringar av fuktinnehållet. Resistansen är starkt temperaturberoende och under 0 °C kan inga säkra kalibreringsvärden erhållas.

Mätningar i fogarna kan för gasbetongväggens del inte relateras till fuktinnehållet i gasbetongen eftersom gasbetongblocken suger åt sig fukt från bruket. Uttorkningen av byggfukten kan dock till en början följas.

Fuktgivarna lades in på olika djup i tegelväggen, i närheten av fönstersmygen i tegelväggen och vid innerväggsanslutningen. Vissa värden från dessa mätningar redovisas i KAP 5.4. Då väggen varit invändigt isolerad har temperaturen i allmänhet varit så låg att inga säkra värden kunnat erhållas.

Mätningar har också gjorts med luftfuktighetsmätare vilka stuckits in i hål i väggen och fått ställa in sig med omgivande lufts relativa fuktighet.

En del fuktprover har tagits ut genom borrhning i väggen. I tegelväggen är detta emellertid ett olämpligt förfarande eftersom det är svårt att kontrollera hur mycket av respektive material provet innehåller och eftersom avdunstningen på grund av uppvärmning vid borrhningen inte kan försummas. De prover som tagits ut i gasbetongväggen har gett mycket motsägelsefulla resultat. Felkällorna är troligen för stora.

Till största delen har fuktförhållandena studerats genom inspektion, helt enkelt genom att isoleringen efter en lämplig tidpunkt tagits bort och förekomsten av eventuell synlig kondensation noterats. De klimatförhållanden som rått vid försöken har varit sådana att kondensatet i allmänhet avsatts som is vid gränsen mellan mineralull och tegelvägg respektive gasbetongvägg. Under sådana förhållanden är fukthaltsändringarna inne i själva väggen mycket små även om kondensation förekommer vid gränsskiktet.

Klimatet på kalla och varma sidan har valts så att kondensation beräkningsmässigt bör inträffa i båda väggtyperna. Alltför extrema klimatförhållanden har dock undvikits. På grund av långvariga driftsstörningar på klimatanläggningen har antalet försök fått begränsas. På varma sidan har klimatet under alla försöken varit samma, ca +22 °C och 35% relativ luftfuktighet. På kalla sidan har temperaturen varit -10 eller -20 °C. Efter byte av isolering eller ändrad temperatur har stationära förhållanden fått råda under viss tid, vanligen 4 - 8 veckor.

Försöken har i stora drag gått till enligt följande. Efter uttorkningsfasen följde en lång period med fel på klimatanläggningen, då inga försök kunde göras. Därefter isolerades väggen med 10 cm mineralull. Då detta försök avslutats fick väggen torka ut under några veckor. Sedan gjordes isolering med 5 cm mineralull. Vid avslutat försök gjordes ingen uttorkning, utan väggen isolerades direkt med 15 cm mineralull.

5.3 TEMPERATURMÄTNINGAR

5.3.1 Oisolerad vägg

I FIG 5.2 visas uppmätta temperaturfördelningar i tegelväggen och i gasbetongväggen vid -10 och -20 °C på kalla sidan. De uppmätta värdena har jämförts med teoretiskt beräknade temperaturfördelningar. För tegelväggen fås ganska god överensstämmelse mellan uppmätta värden och en fördelning som är beräknad med $\alpha_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_u = 14 \text{ W/m}^2\text{K}$ och $\lambda_{\text{tegel}} = 0,70 \text{ W/mK}$.

Värmeövergångsförhållandena i klimatrumsen påverkas av att väggarna är klädda med al-folie och att klimatet styrs av fläktar.

För gasbetongväggen är överensstämmelsen med en beräknad linjär temperaturfördelning ($\lambda_{\text{gasbetong}} = 0,22 \text{ W/mK}$) betydligt sämre. De använda λ -värdena har valts med hänsyn till fukt i väggen, men är möjligen något för höga eftersom värdena i Svensk Byggnorm innehåller säkerhetspåslag. Samma beräknade temperaturfördelningar kan fås med lägre λ -värden om övergångsmotståndet samtidigt ökas.

För att kontrollera vilket fel som fås genom att mätningen görs i en fog har en tvådimensionell datorberäkning gjorts av temperaturfördelningen i en fog mellan två gasbetongblock. Fogen har förutsatts vara 10 mm bred och värmeledningstalet för bruk och gasbetong har satts till 1,0 respektive 0,20 W/mK. Resultatet visas i FIG 5.3.

Skillnaden i yttemperatur är ganska stor, ca 2,5 °C vid innerytan under rådande temperaturförhållanden. Längre in i väggen är avvikelserna mellan de två snitten mycket liten.

De uppmätta värdena kan emellertid inte förklaras av den tvådimensionella effekten eftersom den invändiga yttemperaturen ligger betydligt högre än vad som fås om man förlänger en rät linje genom mätpunkterna inne i väggen.

Utöver ren onoggrannhet hos mätutrustningen finns givetvis felkällan att termoelementens verkliga placering i väggen inte överensstämmer med ritningen. En möjlig orsak till mätfel är också att anläggningen mellan termoelement och väggyta (som är ganska skrovlig) är dålig. Detta skulle i så fall medföra att den uppmätta invändiga yttemperaturen är för hög.

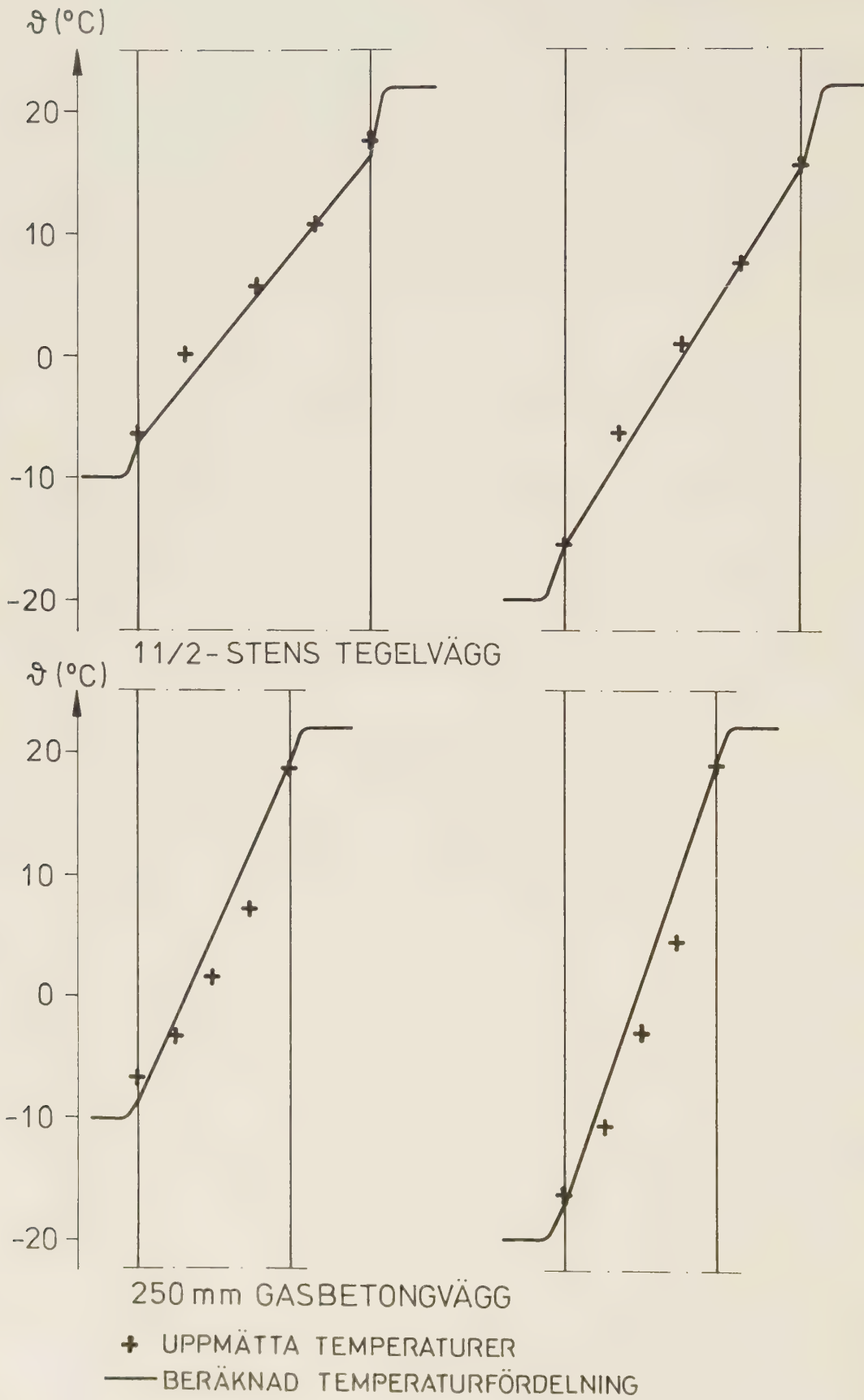


FIG 5.2. Uppmätta och beräknade temperaturfördelningar i oisolerad vägg.

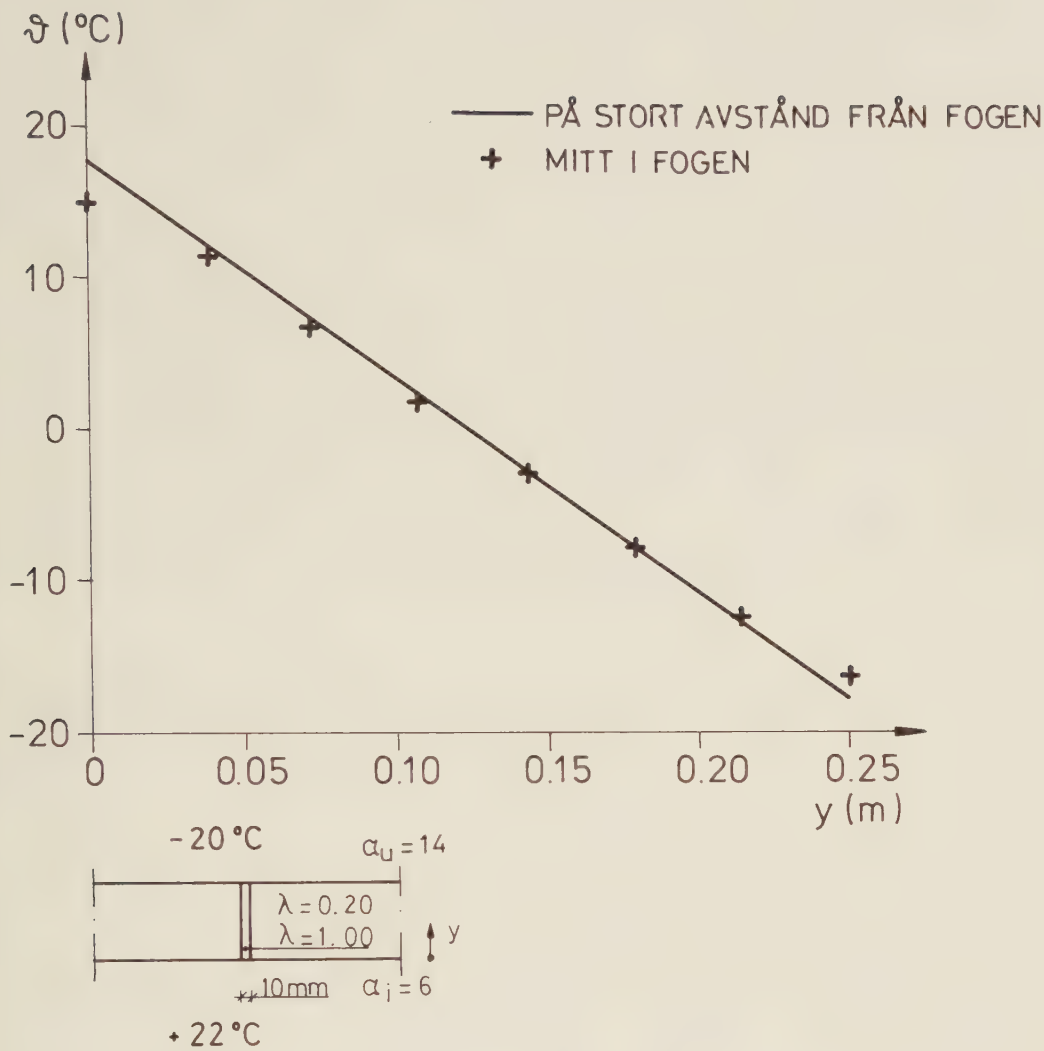


FIG 5.3. Tvådimensionell beräkning av temperaturfördelning i fog mellan gasbetongblock.

Den uppmätta temperaturfördelningen i gasbetongväggen är snarast parabelformad. Om den är riktig innebär den att gasbetongens värmeledningstal varierar genom väggen eftersom värmeflödet är konstant. Värmeledningstalet är i så fall lägst närmast varma sidan. Temperaturberoendet hos värmeledningstalet skulle medföra motsatt tendens. En möjlig förklaring är att fuktinnehållet är lägst närmast varma sidan, vilket inte är orimligt.

I FIG 5.4 visas uppmätta temperaturer i anslutningen mellan tegelväggen och betongbjälklaget. De uppmätta temperaturerna har jämförts med en tvådimensionell datorberäkning för halva strukturen (symmetri antas). Några olika övergångskoefficienter och värmeledningstal har provats vid beräkningen. Ganska god överensstämmelse erhöles med fallet i FIG 5.4. Svårast att beskriva vid en beräkning är värmeövergången vid insidan. Värmeövergångskoefficienterna kan säkert variera avsevärt över de olika ytorna. Detta är en trolig förklaring till den dåliga överensstämmelsen mellan uppmätta och beräknade yttemperaturvariationer.

I FIG 5.5 visas uppmätta temperaturer i anslutningen gasbetongvägg - betongbjälklag och anslutningen mellan yttervägg och innervägg av tegel. Inget försök har gjorts att jämföra med beräkningar. Innerväggsanslutningen är i detta fall ingen köldbrygga. Köldbryggeeffekterna vid betongbjälklaget är betydligt mindre vid gasbetongväggen än vid tegelväggen, vilket framgår bland annat av golvtemperaturen.

I fönstersmygarna har termoelement placerats på ena sidostycket och inne i väggen en bit från smygen. Yttemperaturmätningar med en strålningsmätare har gjorts längs linjer på understycket och ena sidostycket i smygarna. De uppmätta temperaturfördelningarna visas i FIG 5.6 och 5.7. Mätpunkternas läge har projicerats på en rät linje.

Mätningen på fönstersmygen i tegelväggen visar tydliga tredimensionella effekter med temperatursänkning i hörnet. Temperaturfördelningen längs understycket är osymmetrisk vilket kan bero på att drevningen kring fönstret är dåligt utförd så att luft läcker in från kalla sidan.

Fönstersmygen i gasbetongväggen ger betydligt mindre köldbryggeeffekter än i tegelväggen, vilket också är väntat.

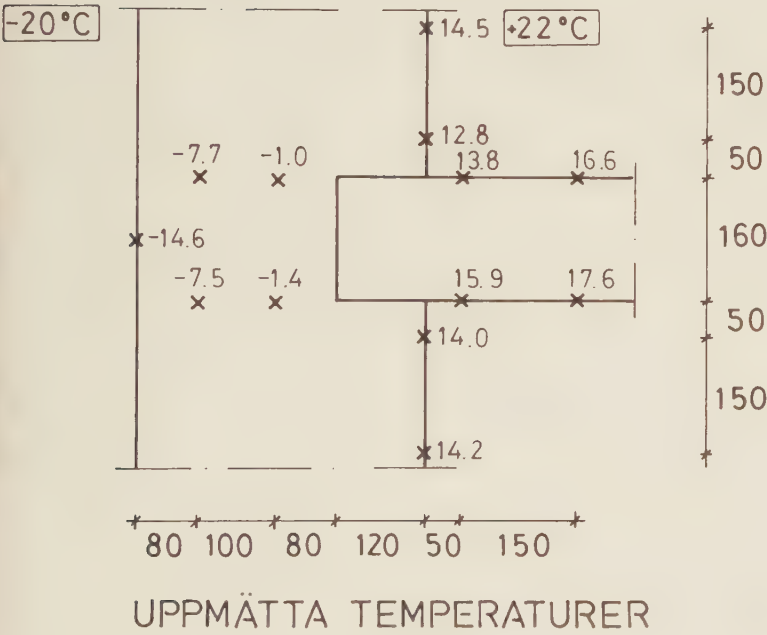
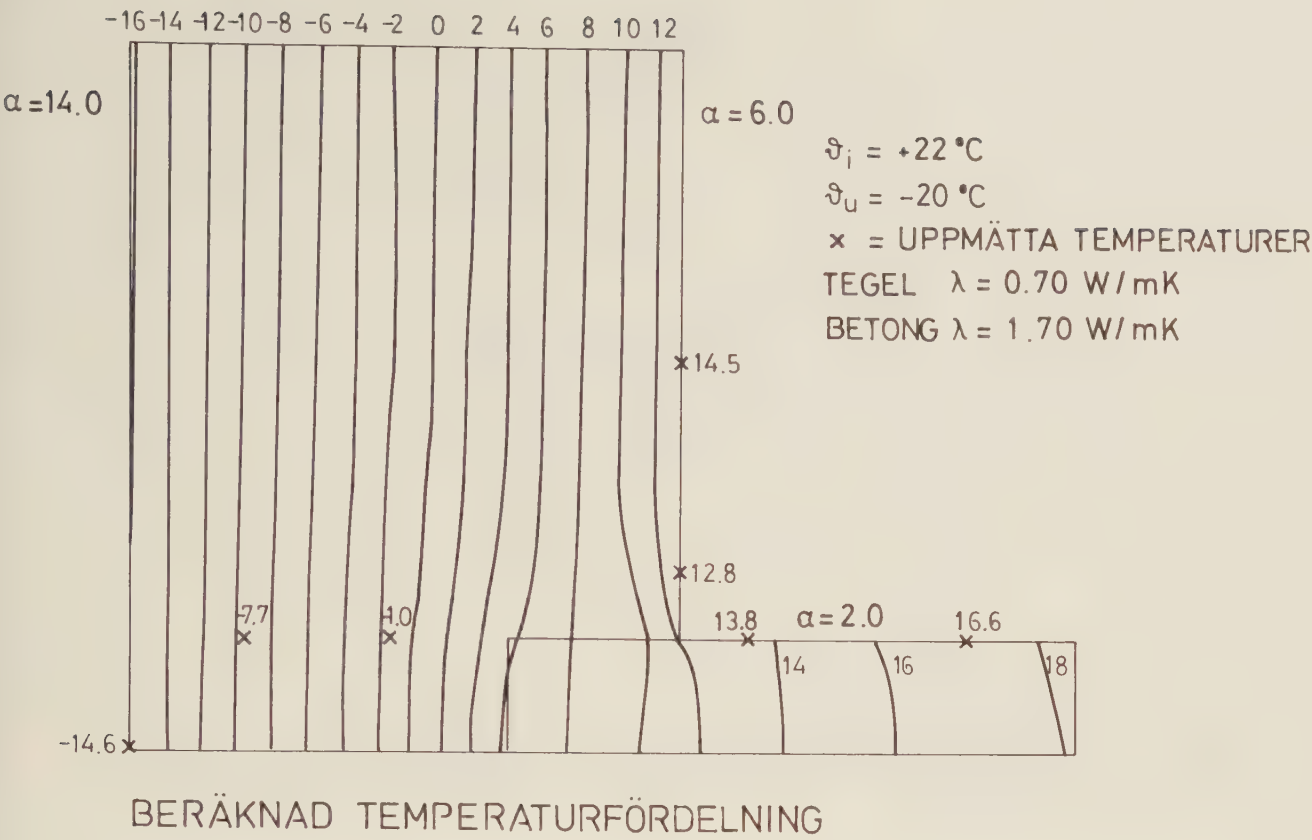
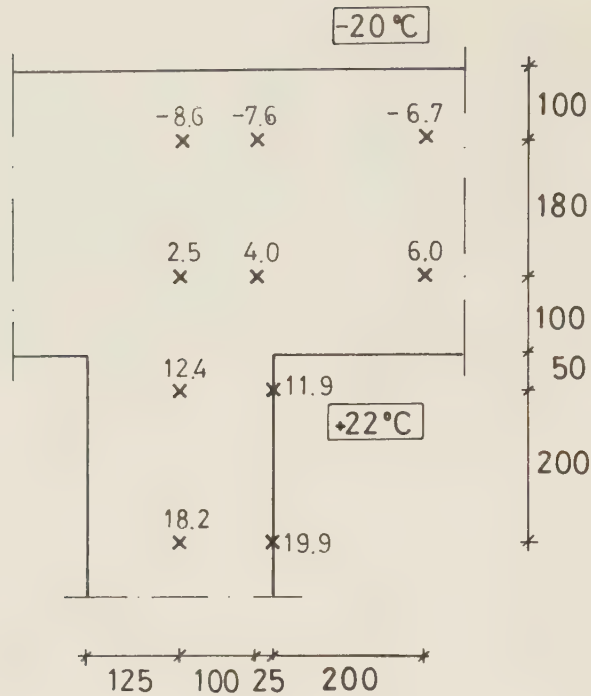
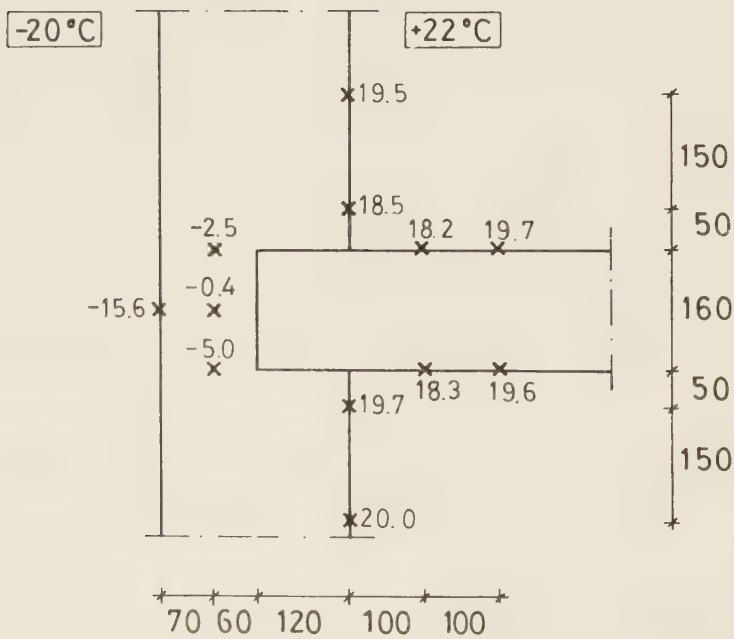


FIG 5.4. Jämförelse mellan uppmätt och beräknad temperaturfördelning. Betongbjälklagsanslutning i 1 1/2-stens tegelvägg utan tilläggsisolering.

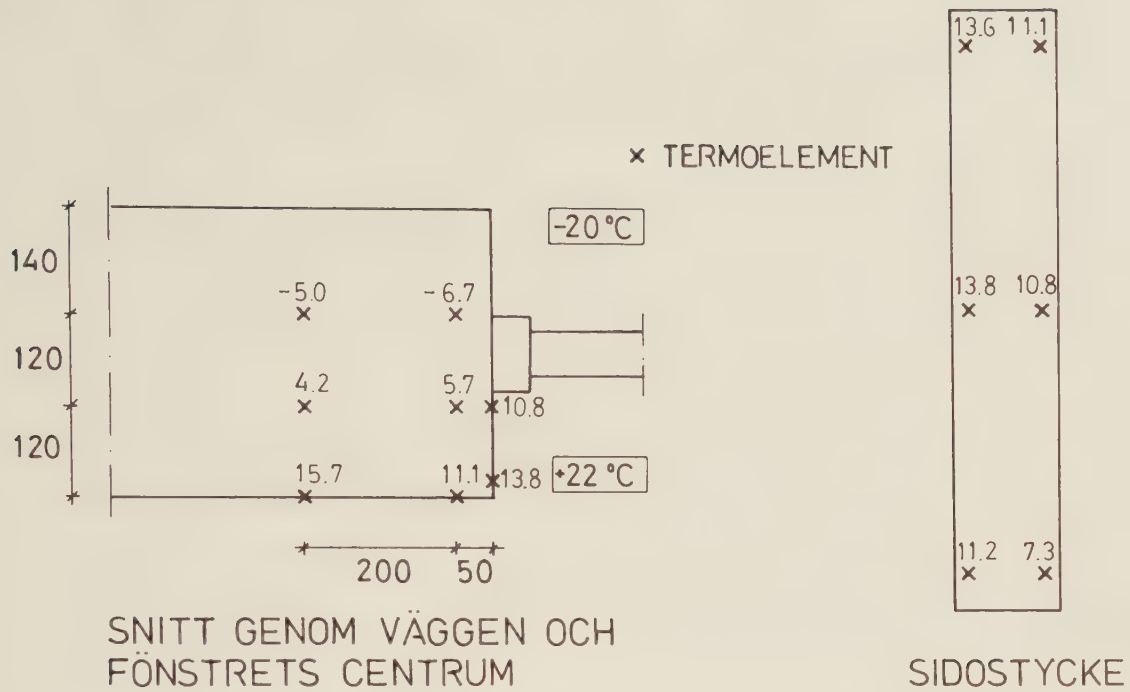


ANSLUTNING MELLAN 1 1/2-STENS TEGELVÄGG OCH INNERVÄGG AV 1-STENS TEGEL



ANSLUTNING MELLAN GASBETONGVÄGG OCH BETONGBJÄLKLÄG

FIG 5.5. Temperaturmätningar vid anslutningar. Oisolerad vägg.



YTTEMPERATURMÄTNING MED STRÅLNINGSMÄTARE.
LINJEN LAGD I SMYGEN CA 2 cm FRÅN KARMENS INSIDA

FIG 5.6. Temperaturmätning i tegelväggens fönstersmyg. Isolerad vägg.

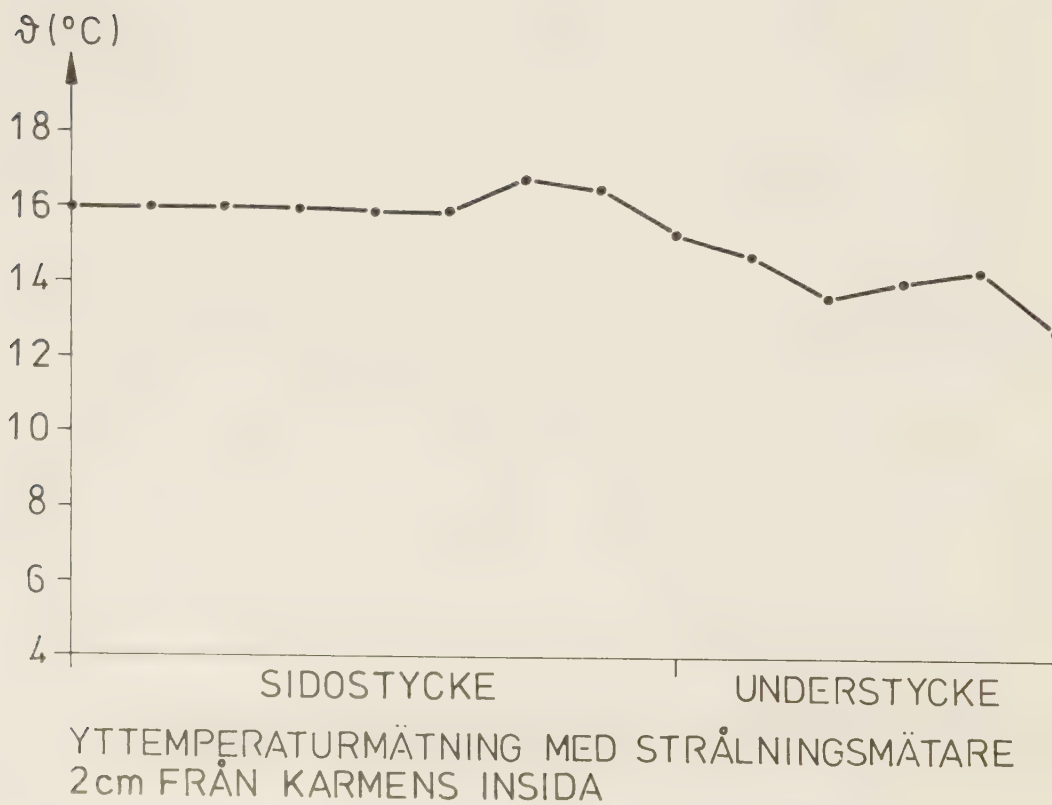
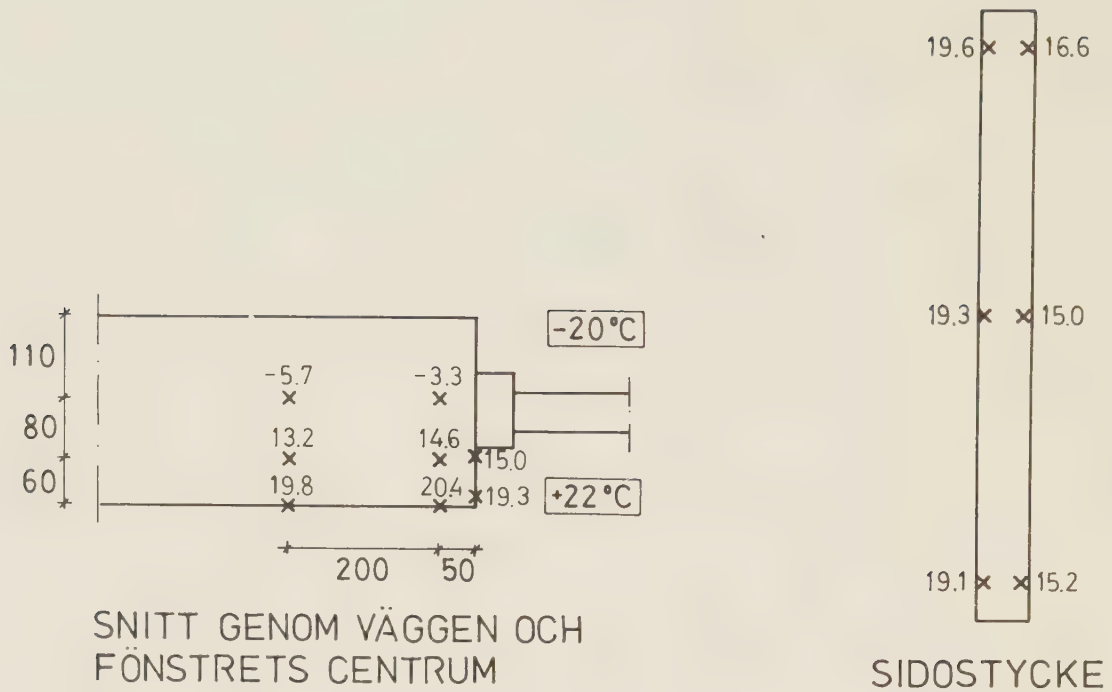


FIG 5.7. Temperaturmätning i gasbetongväggens fönstersmyg. Oisolerad vägg.

5.3.2 Invändig tilläggsisolering med 5 cm mineralull

Då isolertjockleken anges som ovan är det alltid underförstått att det också finns en ytbeklädnad, 19 mm porös träfiberskiva.

I FIG 5.8 visas uppmätta temperaturfördelningar i väggarna, jämförda med teoretiskt beräknade sådana. Mineralullens värmeledningstal har satts till 0,04 W/mK och träfiberskivans till 0,05 W/mK. Övriga data är samma som tidigare.

Det använda λ -värdet för mineralull är högt med hänsyn till att det används under laboratorieförhållanden. Den mineralull som använts är kvalitet A, 23 kg/m³. Överensstämmelsen mellan uppmätta värden och beräknade blir, vid de högre isolertjocklekarna, sämre om lägre värmeledningstal antas. Det är därför troligt att alla de använda värmeledningstalen är för höga.

Inne i väggen ligger uppmätta värden något lägre än beräknade. Detta är dock knappast en genomgående tendens. Även i detta fall är uppmätt temperaturfördelning i gasbetongväggen närmast parabelformad.

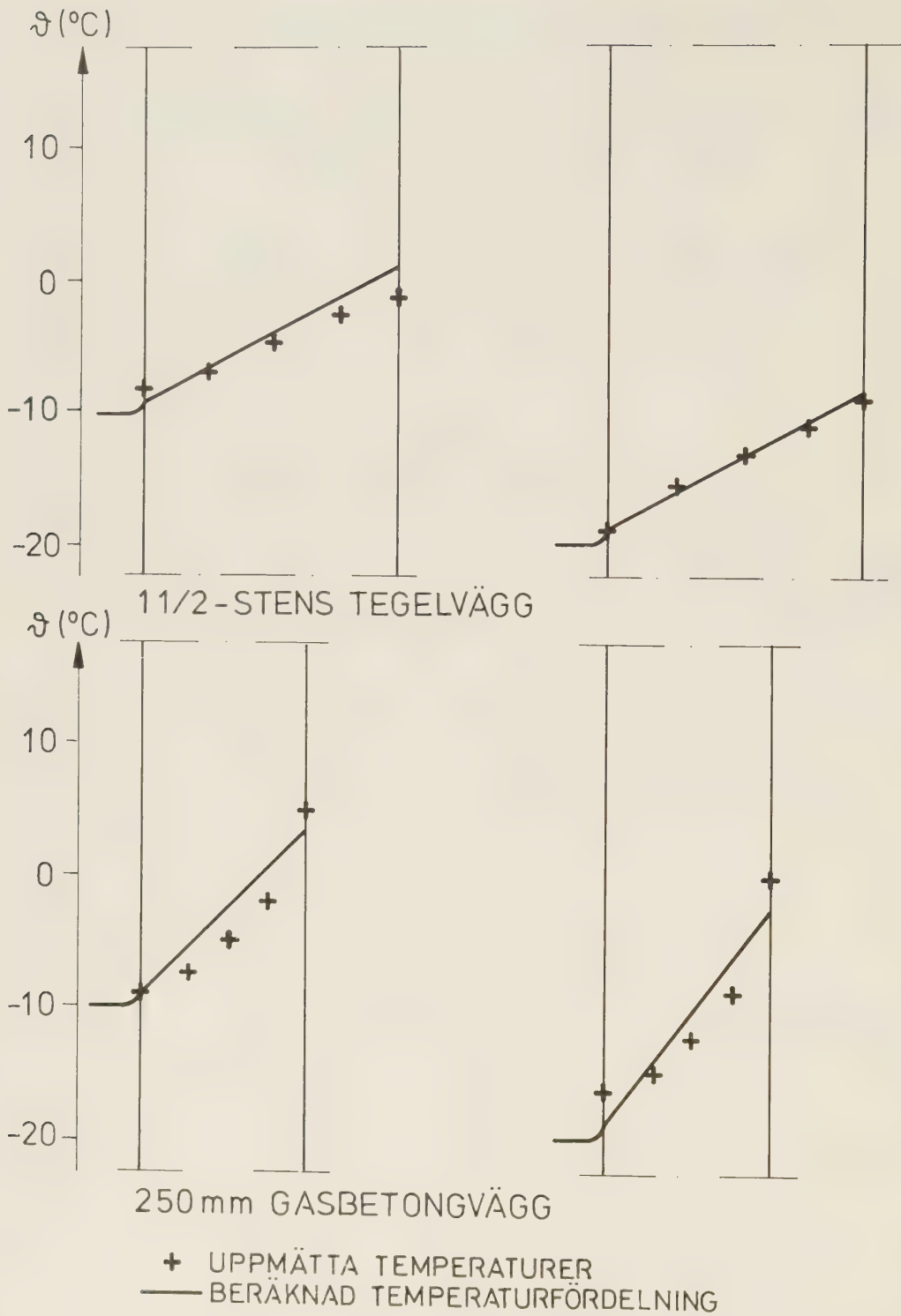
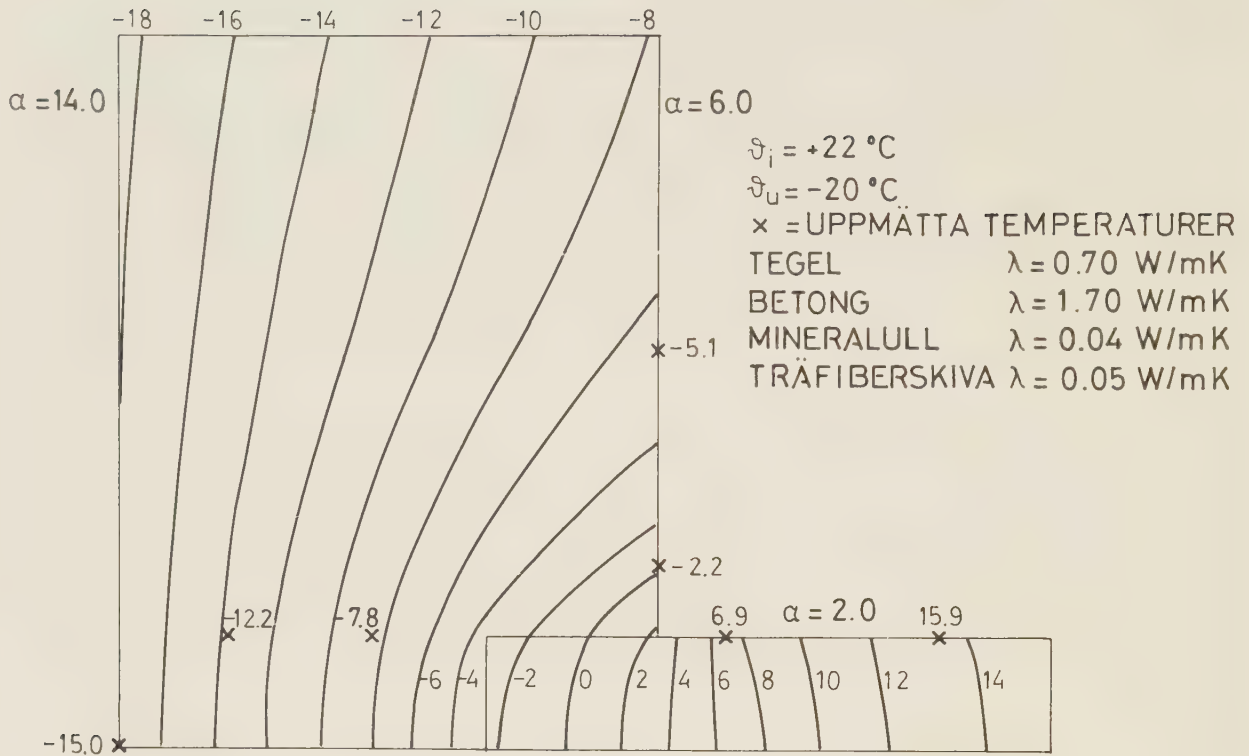


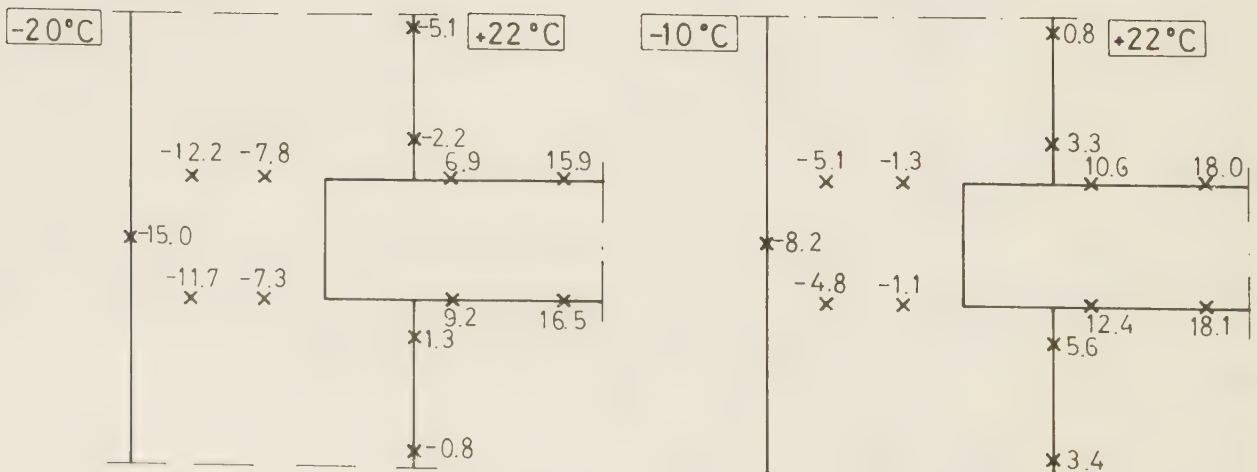
FIG 5.8. Uppmätta och beräknade temperaturfördelningar i väggen vid in-
vändig tilläggsisolering med 5 cm mineralull.

FIG 5.9 visar en jämförelse mellan uppmätta temperaturer och datorberäkning av temperaturfältet vid anslutningen betongbjälklag - tegelvägg. Materialdata och värmeövergång har valts som i tidigare beräkningar. Överensstämmelsen är relativt god. I FIG 5.10 - 5.12 visas, som tidigare, temperaturmätningar vid de övriga köldbryggorna. För fönstersmygarna har ett fall med invändig fönstersmygsisolering undersökts. Denna har utförts av 2×13 mm mineralullsboard (enligt tillverkaren $\lambda = 0,04$ W/mK) som satts runt smygens insidor med ytskikt av en hård träfiberskiva. Ytemperaturmätningar på boarden har inte gjorts i detta fall, men redovisas för fallet med 10 cm isolering i KAP 5.3.3.

Av temperaturmätningarna framgår att köldbryggeeffekterna är av samma storleksordning som vid datorberäkningarna. Temperatursänkningen i fönstersmygarna är emellertid betydligt större än vad som erhållits vid datorberäkningarna. Detta kan bero på att övergångsförhållandena förändras då smygen blir djupare, något som inte tagits hänsyn till i beräkningarna.



BERÄKNAD TEMPERATURFÖRDELNING



UPPMÄTTA TEMPERATURER

FIG 5.9. Jämförelse mellan uppmätt och beräknad temperaturfördelning. Betongbjälklagsanslutning i 1 1/2-stens tegelvägg. Invändig tilläggsisolering med 5 cm mineralull + 19 mm porös träfiberskiva.

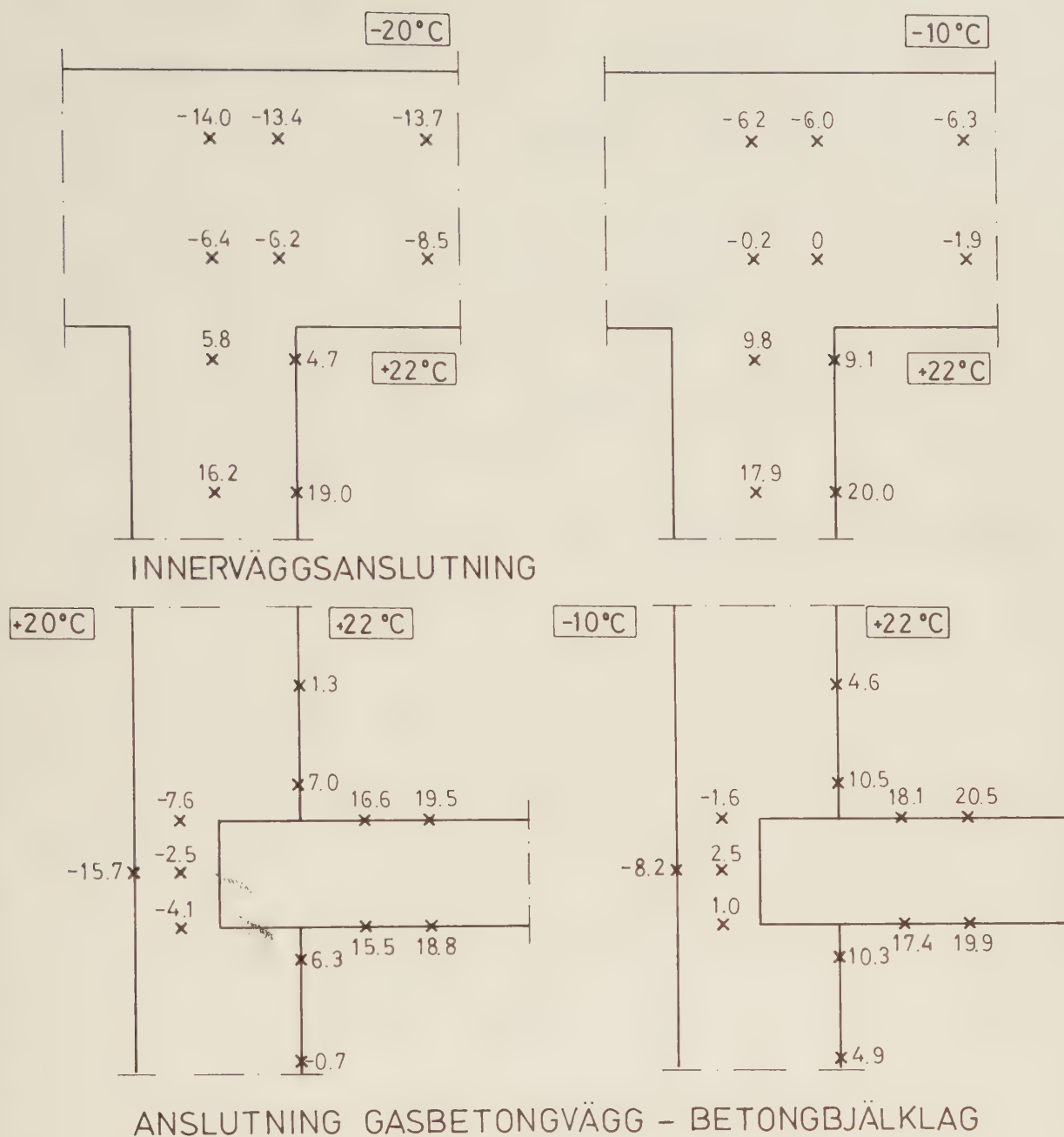
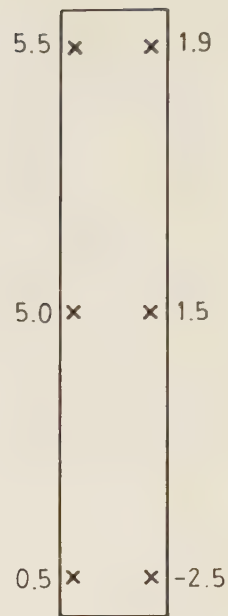
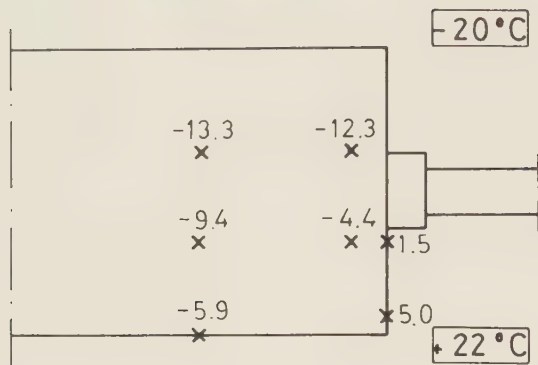
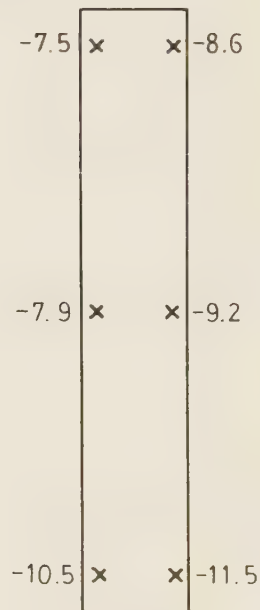
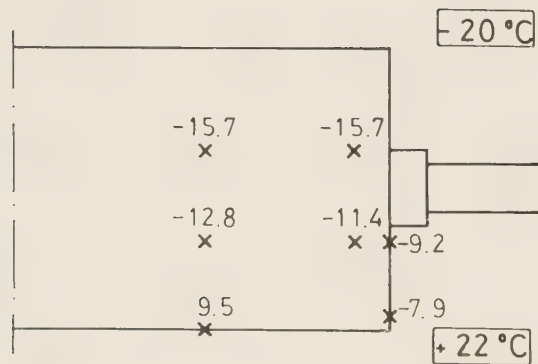


FIG 5.10. Temperaturmätningar vid anslutningar. 5 cm invändig tilläggsisoler-
ring.

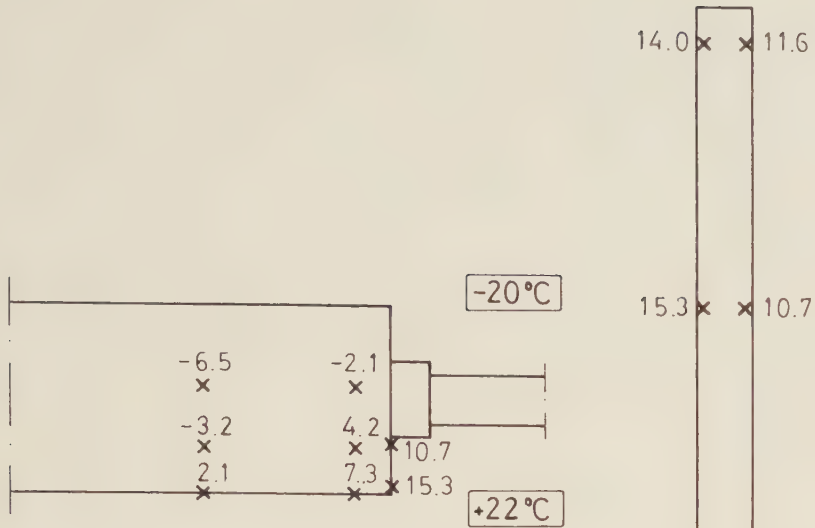


UTAN ISOLERING I SMYGEN

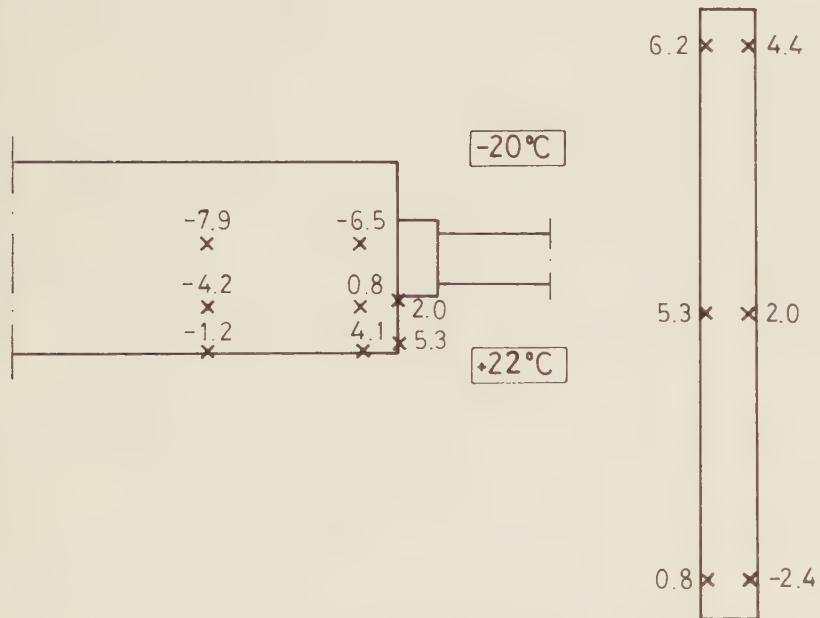


$2 \times 13 \text{ mm}$ MINERALULLSBOARD I SMYGEN

FIG 5.11. Temperaturmätningar i fönstersmyg, tegelväggen. 5 cm invändig tilläggsisolering. Med och utan isolering i smygen.



UTAN ISOLERING I SMYGEN



2x13mm MINERALULLSBOARD I SMYGEN

FIG 5.12. Temperaturmätningar i fönstersmyg, gasbetongväggen. 5 cm invändig tilläggsisolering. Med och utan isolering i smygen.

5.3.3 Invändig tilläggsisolering med 10 cm mineralull

I FIG 5.13 visas uppmätta temperaturfördelningar vid -10 och -20 °C på kalla sidan, jämförda med beräknade sådana. För tegelväggen ligger uppmätta värden något över beräknade. Förklaringar till detta kan givetvis vara utförandefel, mätfel och flerdimensionella effekter. Det senare är dock mindre troligt, med hänsyn till mätresultaten vid 5 cm isolering. Andra möjliga förklaringar är att kondensation mot väggen medför att temperaturen stiger, samt att det isskikt som bildas vid kondensationszonen medför nedsatt värmeisoleringsförmåga hos mineralullen.

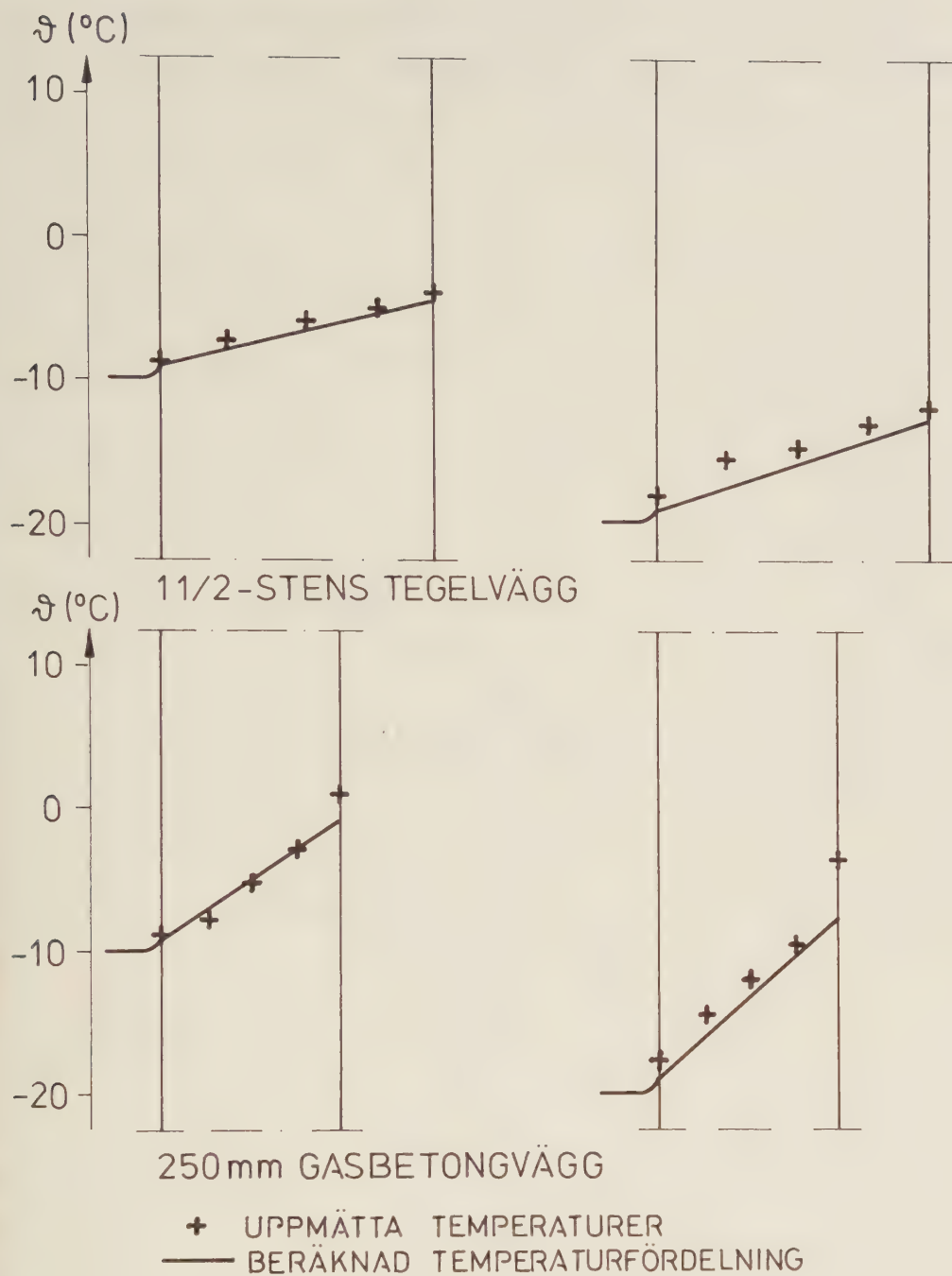


FIG 5.13. Uppmätta och beräknade temperaturfördelningar i vägg invändigt isolerad med 10 cm mineralull.

Med ett numeriskt exempel kan dessa effekters storleksordning undersökas. I FIG 5.14 visas schematiskt temperaturfördelning och värme flöde genom väggen med och utan kondensation. Stationära förhållanden förutsätts. q_1 och q_2 är värme flöden på grund av temperaturskillnad och q_k på grund av

kondensation och isbildning av kondensatet i gränsen mellan de två skikten. Skikt 1 motsvarar isolermaterialet och ligger alltså närmast varma sidan. Skikt 2 motsvarar den befintliga väggen.

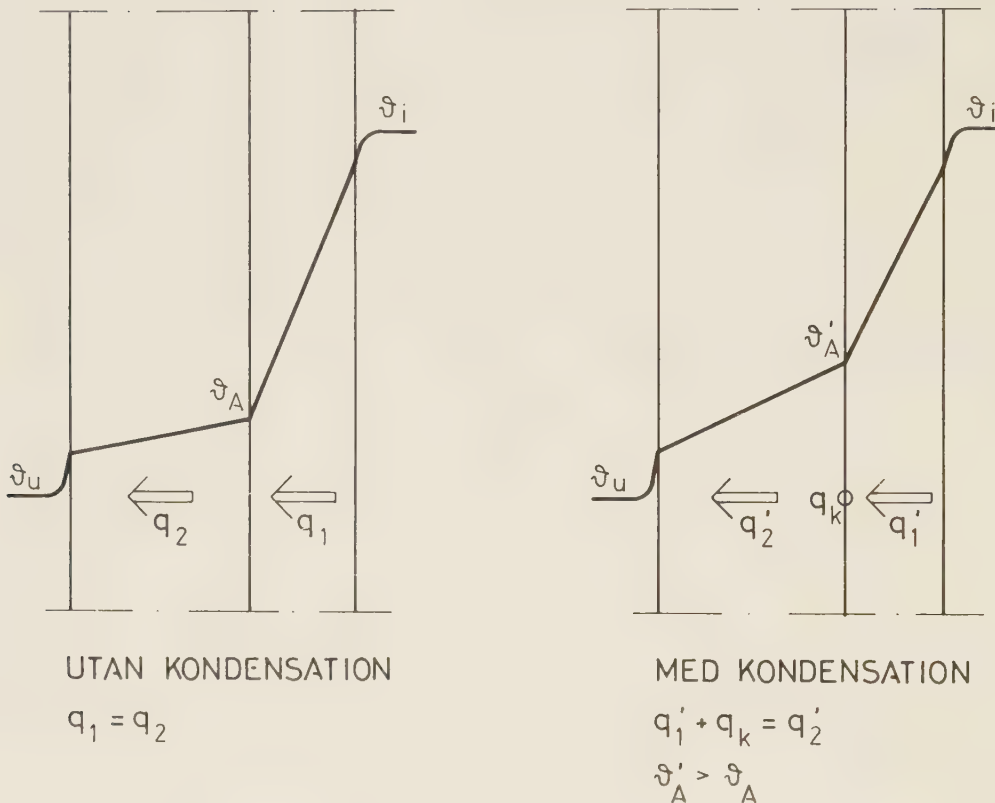


FIG 5.14. Temperaturfördelning och värmeflöden i tvåskiktsvägg med och utan kondensation.

Värmeflödena kan tecknas enligt

$$q_k = r \cdot g = r \left(\frac{v_i - v_s(\vartheta_A')}{z_1} - \frac{v_s(\vartheta_A') - v_u}{z_2} \right)$$

r = omvandlingsvärme $2830 \cdot 10^3$ J/kg

$$q_1' = \frac{\vartheta_i - \vartheta_a'}{m_i + m_1}$$

$$q_2' = \frac{\vartheta_a' - \vartheta_u}{m_2 + m_u}$$

Vid beräkning av q_k ersätts $v_s(v_A')$ med $v_s(v_A)$. Beräkningen görs för tegel- och gasbetongväggen med 10 cm invändig isolering vid -10 och -20 °C på kalla sidan. Innetemperaturen antas vara 22 °C och relativa luftfuktigheten 35%. Övergångskoefficienter och värmeledningstal väljs som tidigare. Diffusionen ut ur kondensationszonen antas vara försumbar.

TABELL 5.1. Beräknad inverkan av kondensation på temperaturfördelning i vägg med 10 cm invändig isolering.

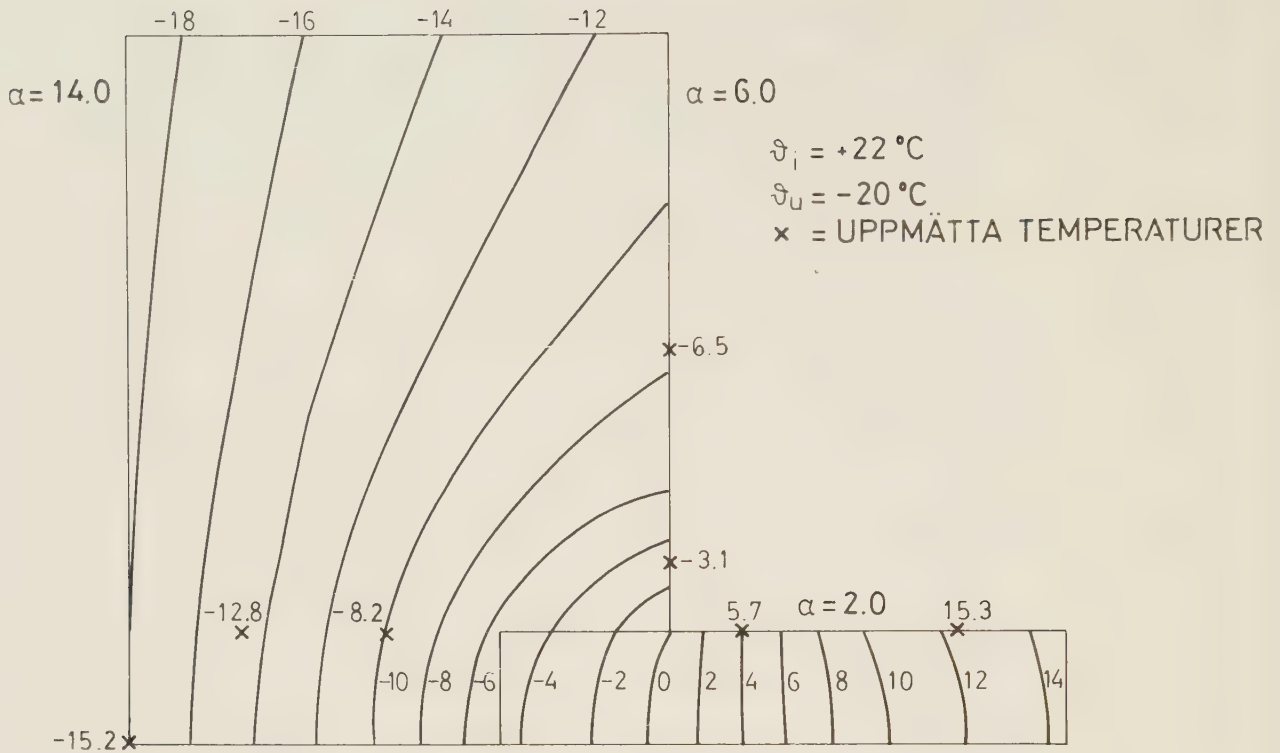
Väggtyp	ϑ_u (°C)	ϑ_A (°C)	$q_1(=q_2)$ (W/m ²)	q_k (W/m ²)	ϑ_A' (°C)
1½-stens tegel	-10	-4,53	8,8	0,7	-4,16
"	-20	-12,82	11,6	1,1	-12,26
250 mm gasbetong	-10	-0,77	7,6	0,5	-0,34
"	-20	-7,88	9,9	0,9	-7,12

Vid beräkning av kondensatets värmeisoleringsförsämrade inverkan antas att det finns ett 5 mm tjockt isskikt i isoleringen vid gränsen till den gamla väggen. Mineralullen antas ha helt förlorat sin isoleringsförmåga här.

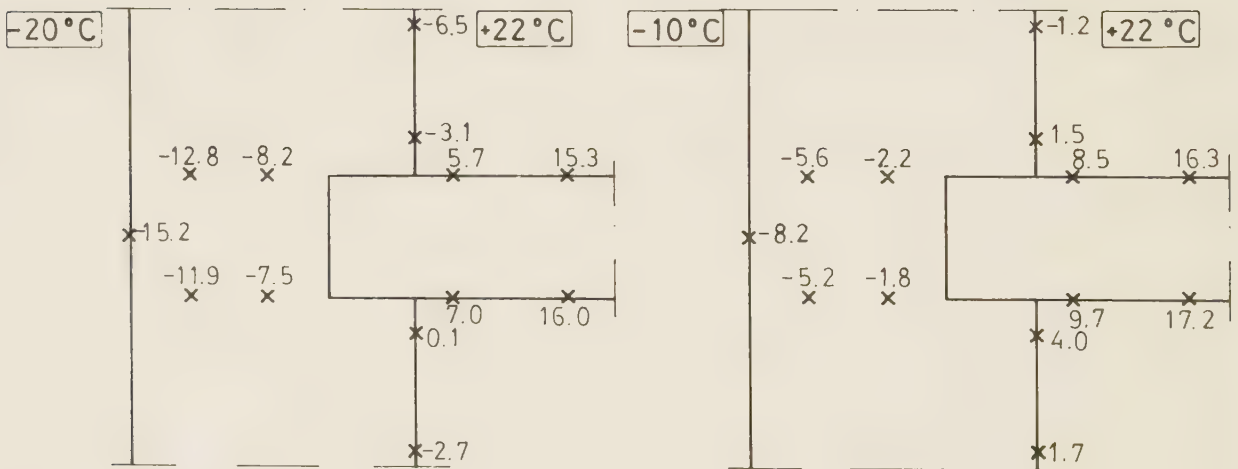
$$\begin{aligned}
 \text{Tegelväggen: } \vartheta_u = -10 \text{ } ^\circ\text{C} &\Rightarrow \vartheta_A = -4,33 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 \vartheta_u = -20 \text{ } ^\circ\text{C} &\Rightarrow \vartheta_A = -12,56 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 \text{Gasbetongväggen: } \vartheta_u = -10 \text{ } ^\circ\text{C} &\Rightarrow \vartheta_A = -0,48 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 \vartheta_u = -20 \text{ } ^\circ\text{C} &\Rightarrow \vartheta_A = -7,50 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

De två effekterna kan delvis förklara avvikelserna mellan uppmätta och beräknade värden. En annan felkälla är monteringen av isoleringen. Isoleringen placeras bakom en skiva som kläms fast vid sidorna. En något för stor spalt vid monteringen av 5 cm-isoleringen kan möjligen medföra en extra isolering. Mineralullsskivorna har ibland övermått vid monteringen.

FIG 5.15 visar uppmätta temperaturer i bjälklagsanslutningen jämförda med en datorberäkning. Överensstämmelsen är sämre än i fallet med 5 cm isolering.



BERÄKNAD TEMPERATURFÖRDELNING



UPPMÄTTA TEMPERATURER

FIG 5.15. Jämförelse mellan uppmätt och beräknad temperaturfördelning. Betongbjälklagsanslutning i $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg. Invändig tilläggsisolering med 10 cm mineralull+19 mm porös träfiberskiva.

I FIG 5.16 visas temperaturmätningar vid innerväggsanslutningen och bjälklagsanslutningen till gasbetongväggen. Man kan notera att temperaturerna på bjälklagets ovan- och undersida är förvånansvärt höga. Detta kan eventuellt bero på att anslutningen av isoleringen till golv och tak inte är perfekt utförd.

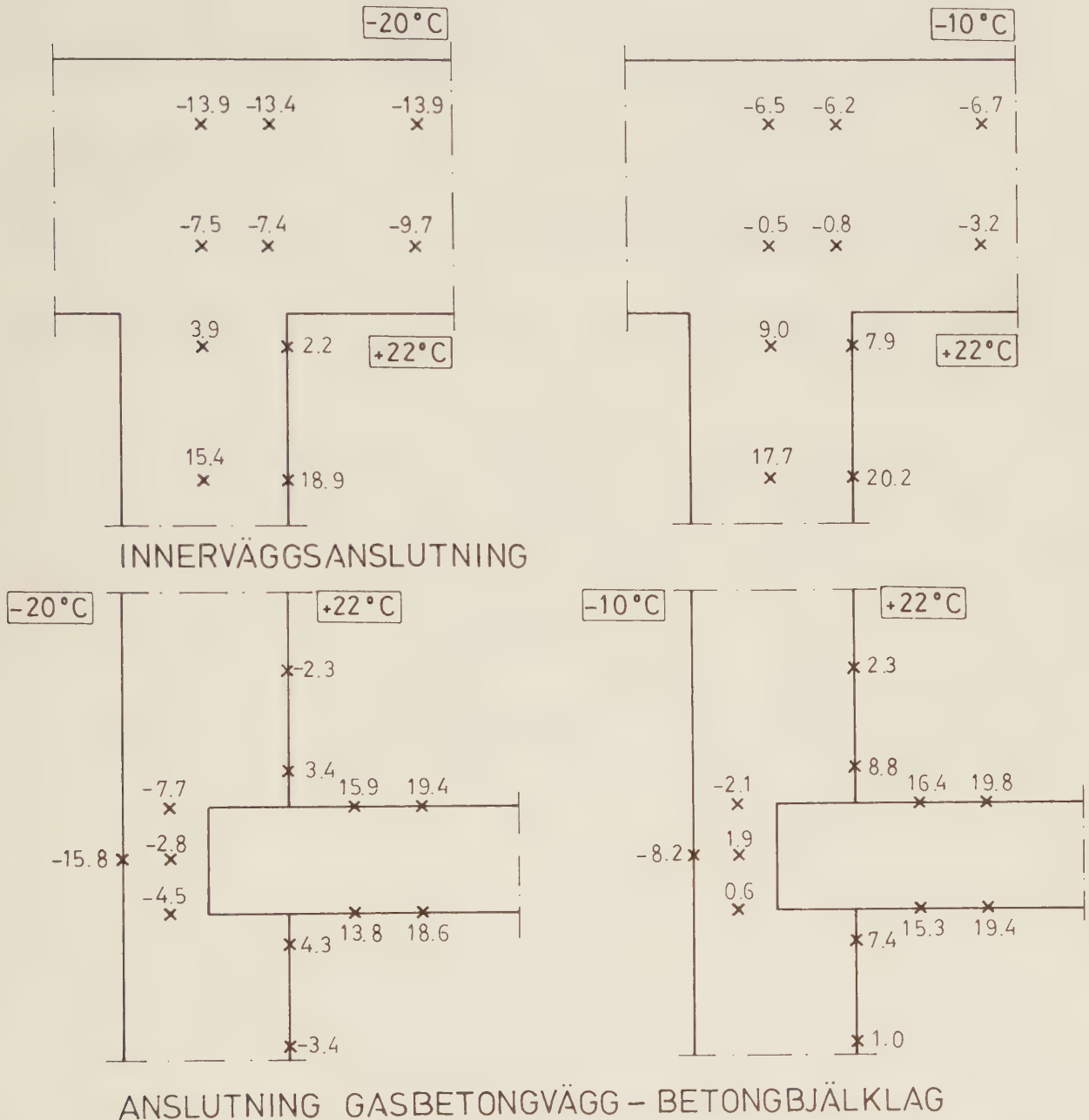


FIG 5.16. Temperaturmätningar vid anslutningar. 10 cm invändig tilläggsisolering.

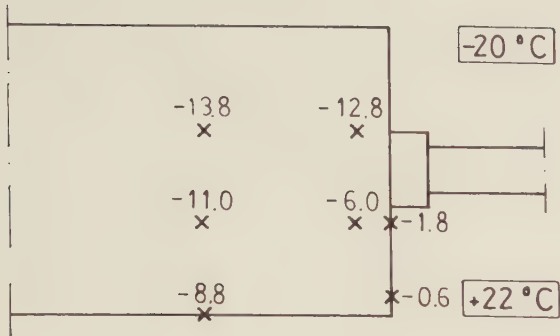
Temperaturerna på betongbjälklagets ovan- och undersida är i allmänhet ganska symmetriska, vilket kan vara förvånande eftersom konvektionsövergångsförhållandena teoretiskt är så olika för golv och tak. I det aktuella fallet orsakar klimatanläggningen störst luftrörelser i undre våningen, vilket bör öka värmeövergången på undersidan av bjälklaget.

I fönstersmygarna har temperaturmätningar gjorts med och utan fönstersmygisolering. Isoleringen har utförts som tidigare med en eller två skivor mineralullsboard.

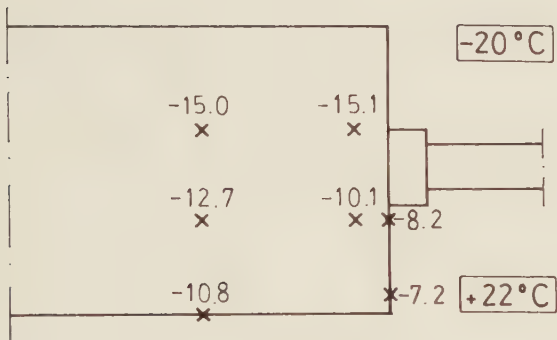
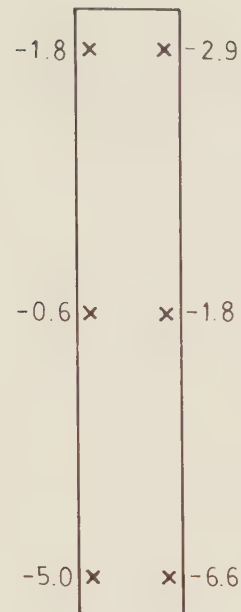
I FIG 5.17 visas termoelementmätningarna och i FIG 5.18 yttemperaturmätningarna på fönstersmygen i tegelväggen för olika fall av fönstersmygisolering. Temperaturen på kalla sidan har i alla mätningarna varit -20°C .

Även efter fönstersmygisoleringen är yttemperaturen i de nedre hörnen mycket låg.

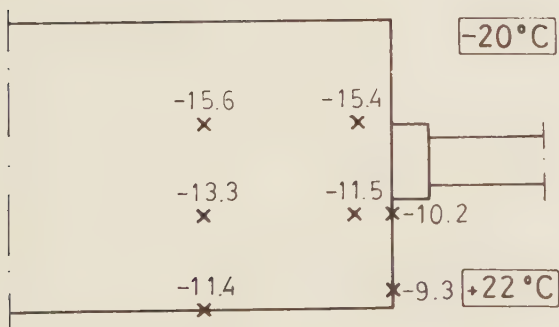
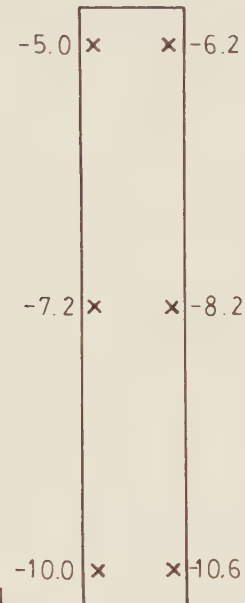
I FIG 5.19 och 5.20 visas samma mätningar på fönstersmygen i gasbetongväggen. Temperatursänkningen jämfört med det oisolerade fallet är utpräglad, speciellt nertill i smygen, även om den inte är lika kraftig som vid tegelväggen.



UTAN ISOLERING I SMYGEN



13mm MINERALULLSBOARD I SMYGEN



2x13mm MINERALULLSBOARD I SMYGEN



FIG 5.17. Temperaturmätningar i tegelväggens fönstersmyg. 10 cm isolering.

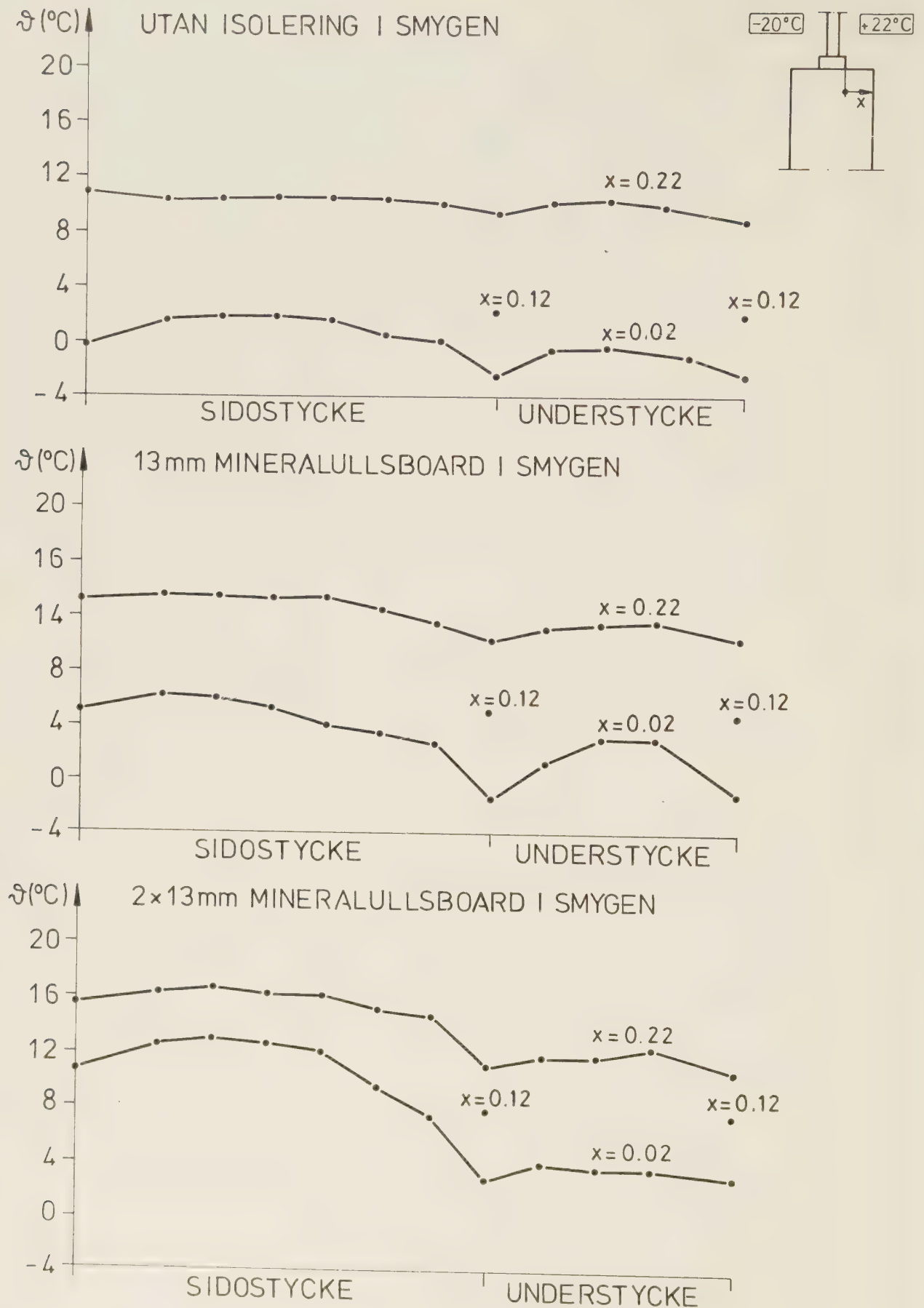
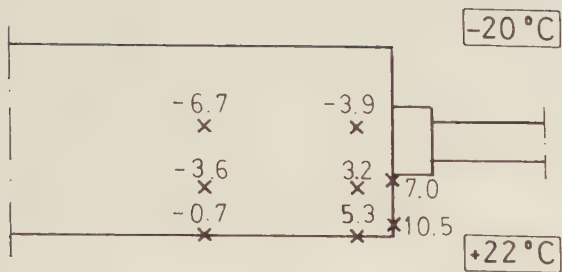
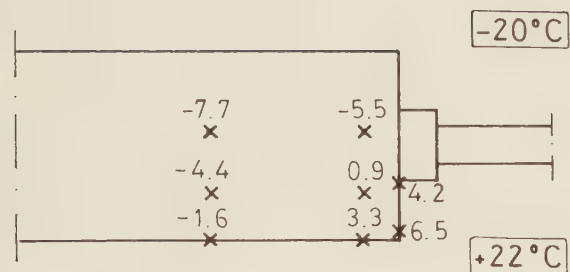


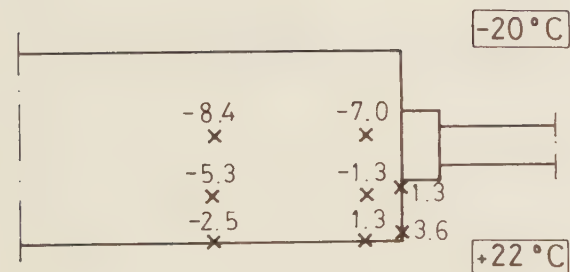
FIG 5.18. Yttemperaturmätningar i tegelväggs fönstersmyg. 10 cm isolering.



UTAN ISOLERING I SMYGEN



13 mm MINERALULLSBOARD I SMYGEN



2x13 mm MINERALULLSBOARD I SMYGEN



FIG 5.19. Temperaturmätningar i gasbetongväggens fönstersmyg. 10 cm isolering.

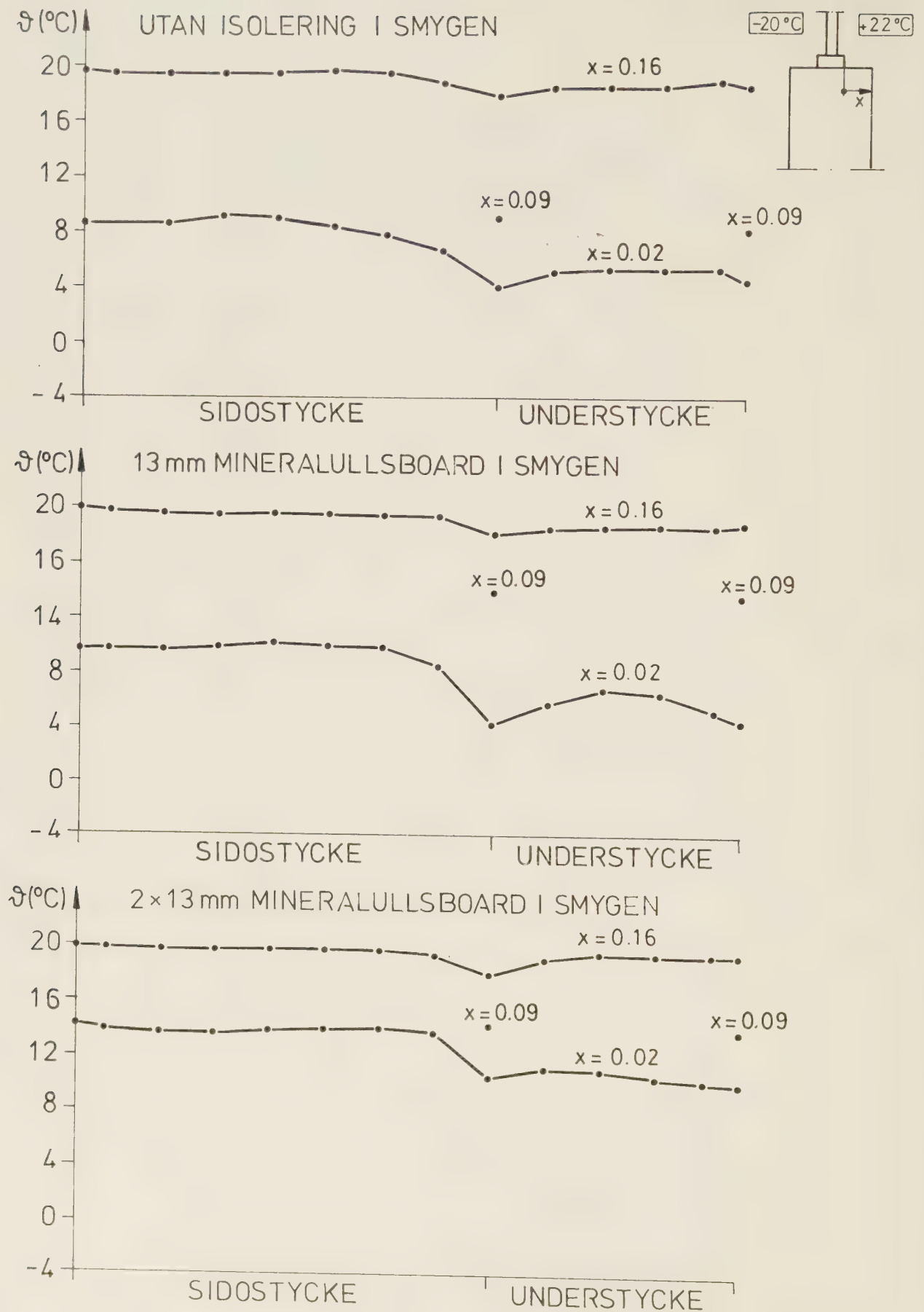


FIG 5.20. Yttemperaturmätningar i gasbetongväggens fönstersmyg. 10 cm isolering.

5.3.4 Invändig tilläggsisolering med 15 cm mineralull

I FIG 5.21 visas uppmätta temperaturfördelningar, jämförda med beräknade. I tegelväggen ligger uppmätta värden genomgående över de beräknade. I gasbetongväggen är tendensen i stort sett den motsatta, med undantag för punkterna vid gasbetongskiktets ytor. Jämfört med 10 cm invändig isolering är temperatursänkningen dock tydlig i båda väggarna.

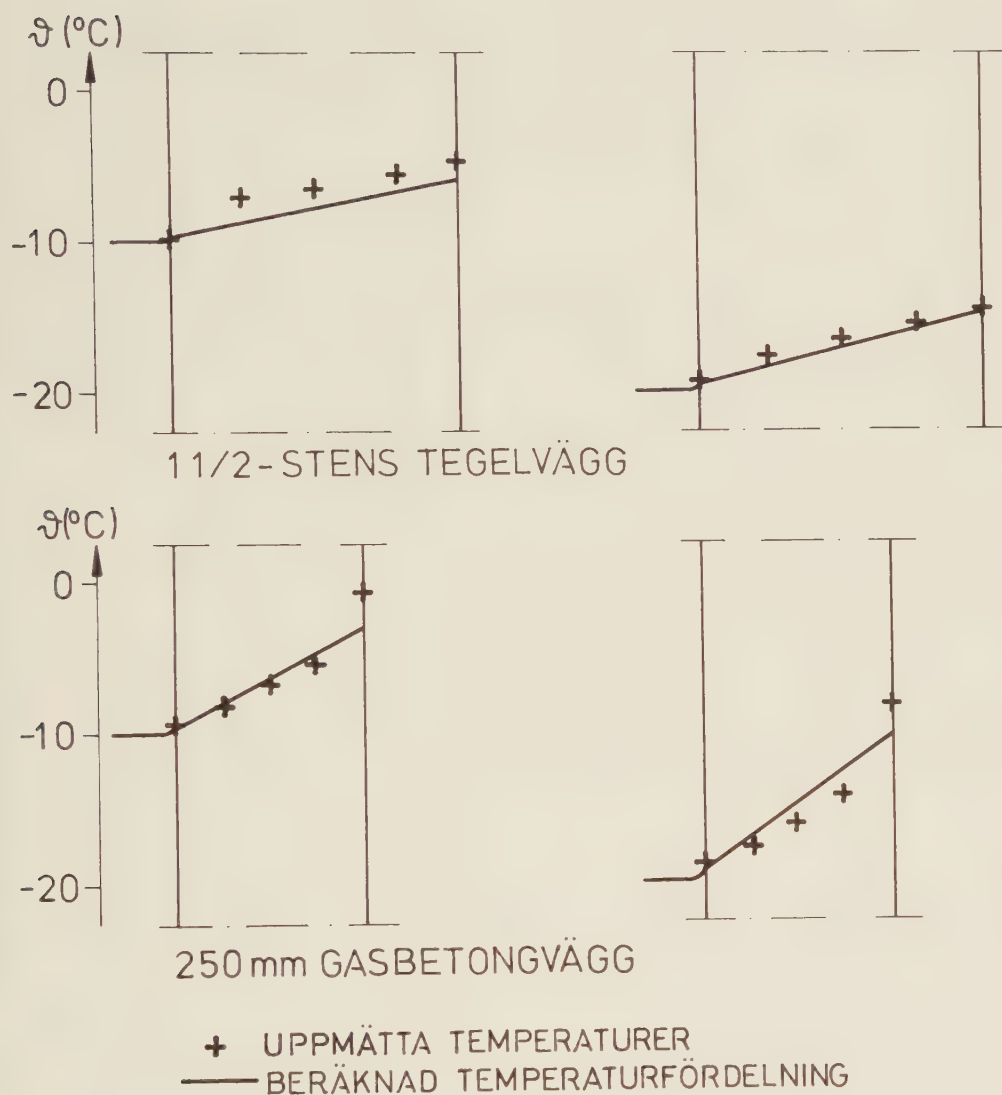
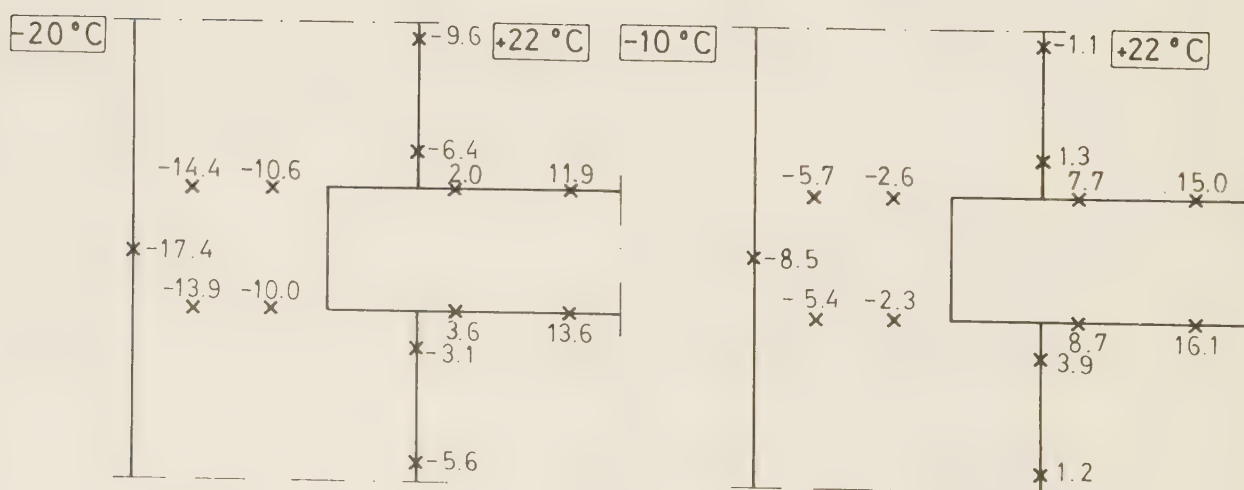
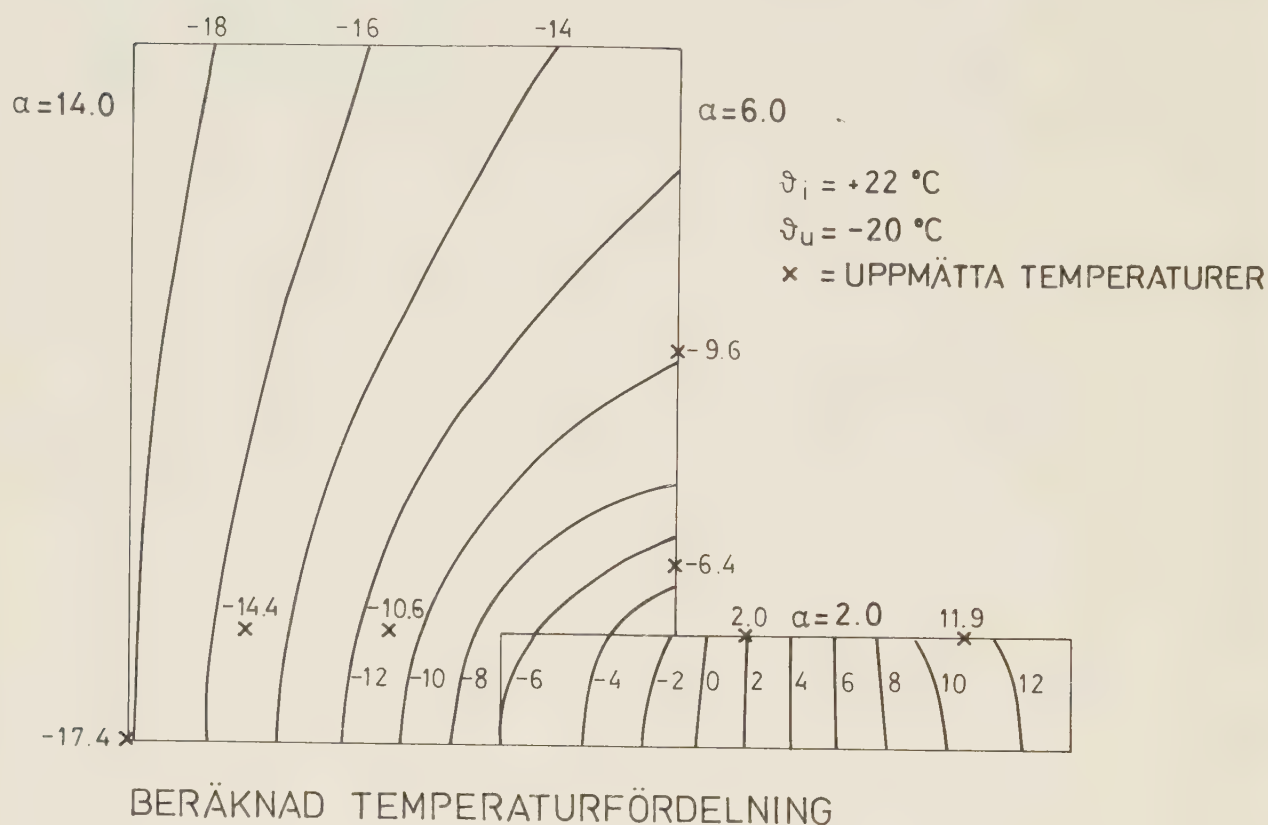


FIG 5.21. Uppmätta och beräknade temperaturfördelningar i vägg invändigt isolerad med 15 cm mineralull.

FIG 5.22 - 5.25 visar temperaturmätningar i anslutningar samt i fönster-smygen med och utan smygisolering.



UPPMÄTTA TEMPERATURER

FIG 5.22. Jämförelse mellan uppmätt och beräknad temperaturfördelning. Betongbjälklagsanslutning i $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg. Invändig tilläggsisolering med 15 cm mineralull + 19 mm porös träfiberskiva.

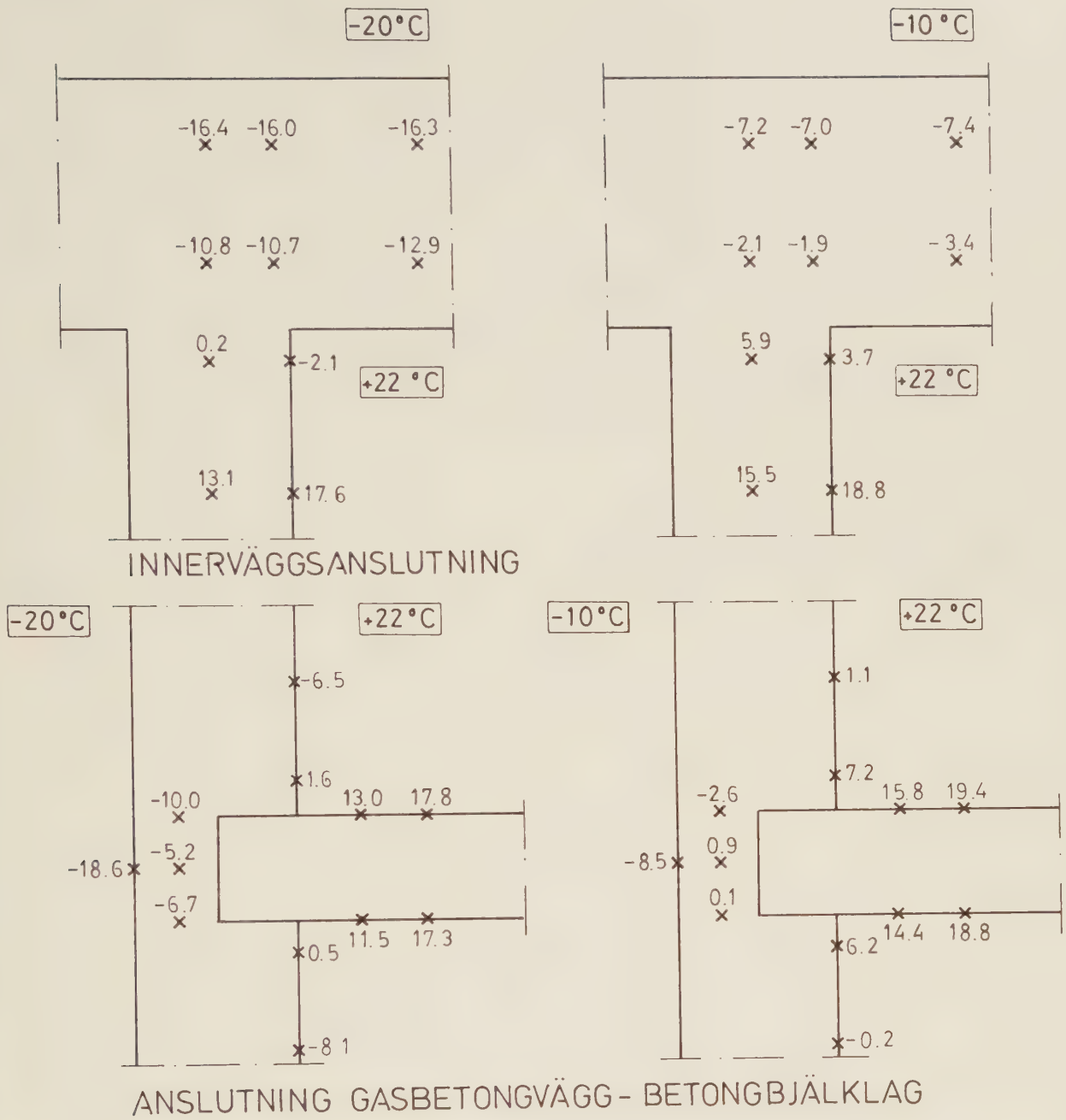
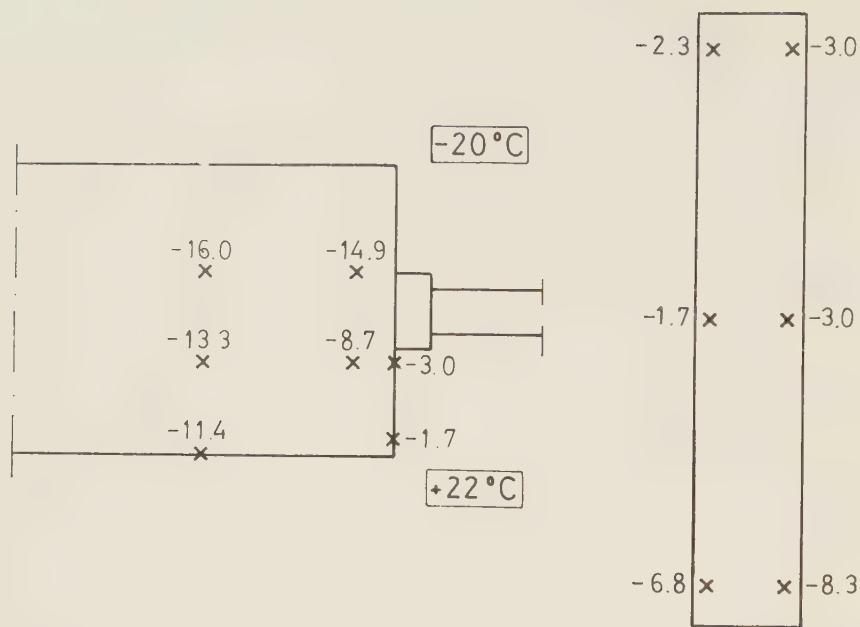
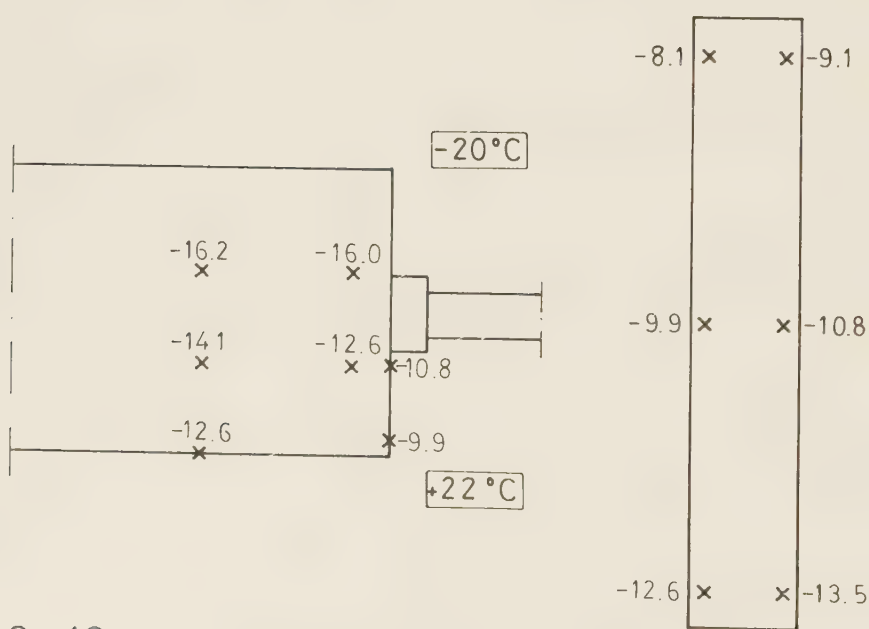


FIG 5.23. Temperaturmätningar vid anslutningar. 15 cm isolering.

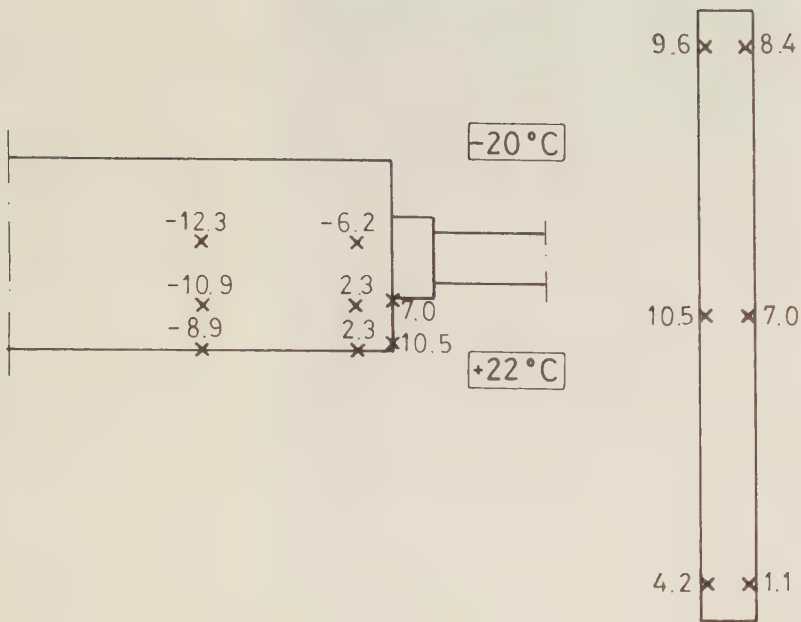


UTAN ISOLERING I SMYGEN

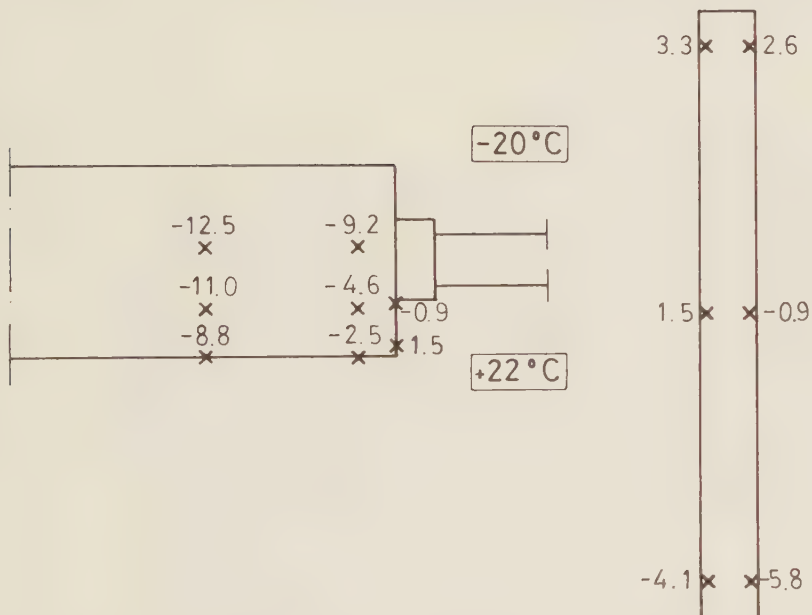


2 x 13 mm MINERALULLSBOARD I SMYGEN

FIG 5.24. Temperaturmätningar i tegelväggens fönstersmyg. 15 cm isolering.



UTAN ISOLERING I SMYGEN



$2 \times 13\text{ mm}$ MINERALULLSBOARD I SMYGEN

FIG 5.25. Temperaturmätningar i gasbetongväggens fönstersmyg. 15 cm isolering.

5.4 KONDENSATION OCH FUKTINNEHÅLL

Uttorkning av provväggen gjordes med värmekabel och byggtorkar i kombination. Större delen av uttorkningsfasen ligger utanför fuktgivarnas mätområde och har alltså inte kunnat följas. Uttorkningsfasen ansågs avslutad då relativa fuktigheten i båda väggtyperna var ca 50%. Därefter följde en period då inga mätningar kunde göras, p g a fel på klimatanläggningen.

Väggen isolerades sedan med 10 cm mineralull. Detta försök pågick i totalt tolv veckor. Under åtta veckor var temperaturen på kalla sidan -10°C och under de följande fyra veckorna var den -20°C .

Efter två veckor inspekterades väggen. Vattenånga hade då kondenserat på delar av tegelväggen och frusit till is. På gasbetongväggen fanns inget synligt kondensat. Gasbetongväggens invändiga yttemperatur var under denna period över 0°C . I eldosan på gasbetongväggen fanns fritt vatten.

Isoleringen, med undantag av fönstersmygsisoleringen, fick därefter sitta orörd tills försöket avslutades.

Den tunna fönstersmygsisoleringen, 13 mm mineralullsboard, satt på i två veckor. Under första veckan var temperaturen på kalla sidan -10°C och under andra veckan var den -20°C . När isoleringen byttes hade is bildats i smygen under boarden vid tegelväggen. Under två veckor därefter med -20°C var fönstersmygsisoleringen 2×13 mm board. Sista veckan under försöket användes ingen fönstersmygsisolering. Då denna togs bort fanns is i båda smygarna, kraftigast vid tegelväggen. Eftersom temperaturen i smygen var under 0°C smälte inte isen utan låg kvar tills försöket avslutades.

De följande figurerna är foton som togs då isoleringen just hade tagits bort. Kondensation och isbildning hade då skett även på gasbetongväggen, så att isoleringen frusit fast. Det fanns på flera ställen en tydlig tvådimensionell effekt med is vid fogarna mellan blocken. Ett tjockt isskikt fanns på större delen av tegelväggens insida. Någon inverkan av målning på väggens insida kan inte ses i detta försök eftersom kondensation fanns i ungefär lika stor grad på större delen av väggen.

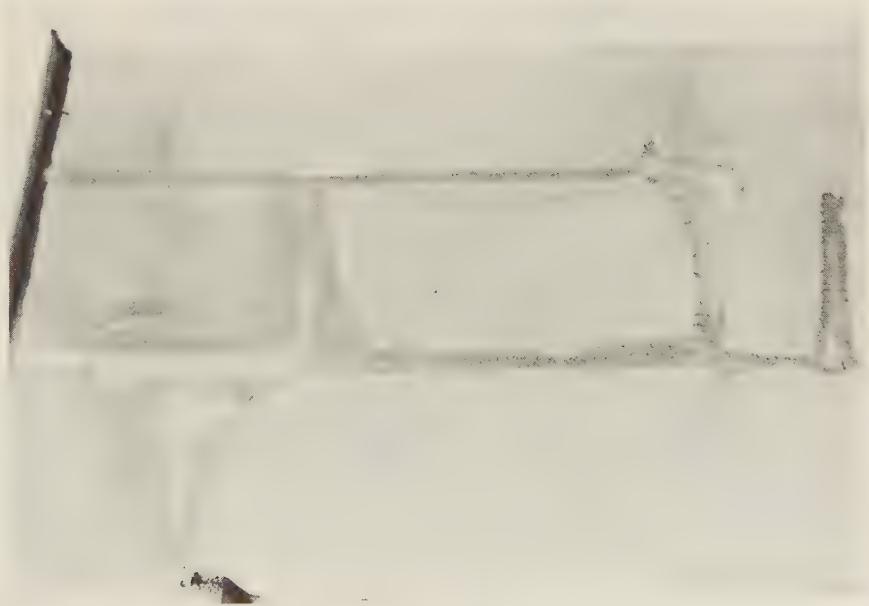


FIG 5.26. Kondensation mot gasbetongväggen efter avslutat försök med 10 cm invändig isolering.



FIG 5.27. Kondensation i fönstersmyg, gasbetongväggen.

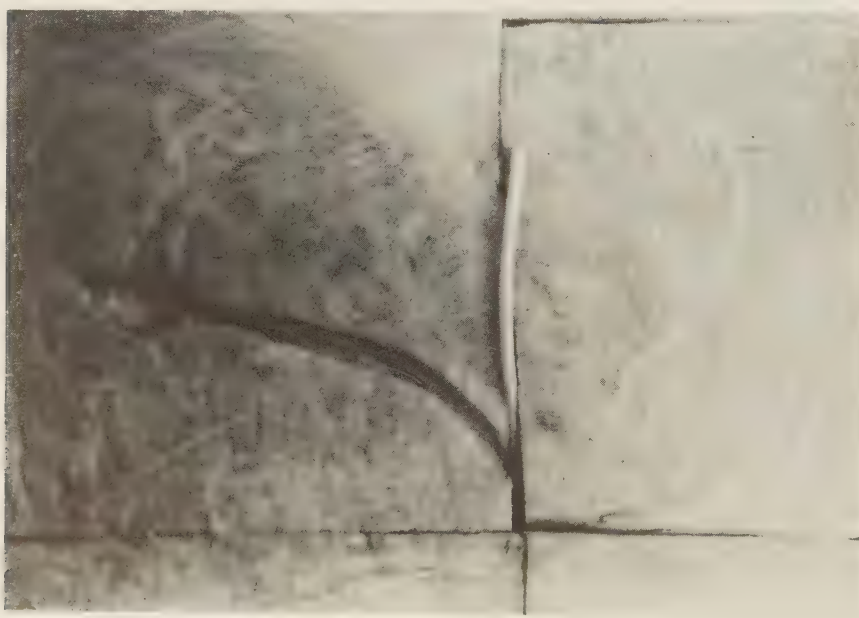


FIG 5.28. Anslutning till eldosa på gasbetongväggen.



FIG 5.29. Kondensation på tegelväggen.

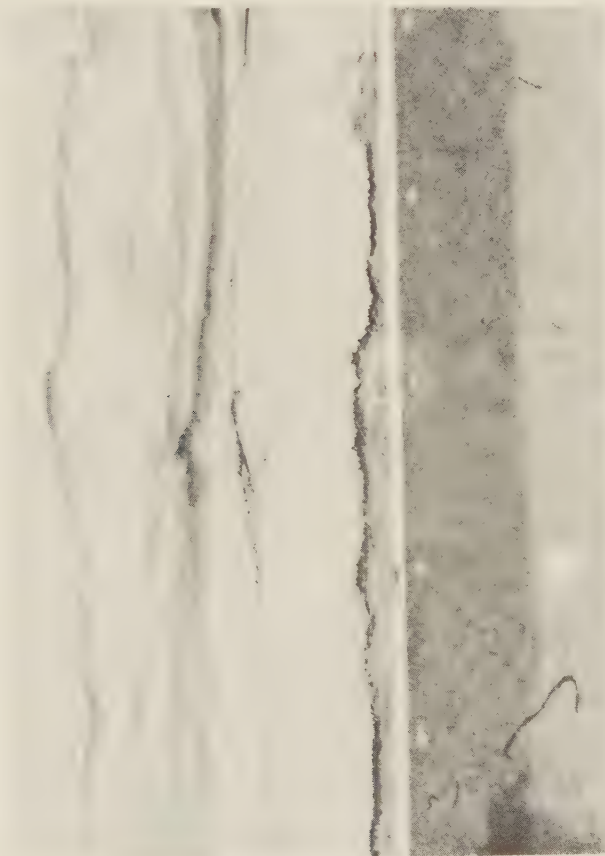


FIG 5.30. Kondensation i fönstersmyg, tegelväggen.

Temperaturen i väggen har under försöket varit så låg att fuktgivarna i bruket inte kunnat användas. Undantaget är en fuktgivare som låg nära fönstersmygen i tegelväggen. Under första delen av försöket var temperaturen här högre än 0°C , och fuktgivarens utslag ökade ständigt. Då försöket avslutades höjdes temperaturen på kalla sidan till 0°C , så att fuktgivaren kunde avläsas igen. I FIG 5.31 visas de erhållna värdena för fuktgivaren i fönstersmygen, uttryckta i fuktkvot hos bruket.

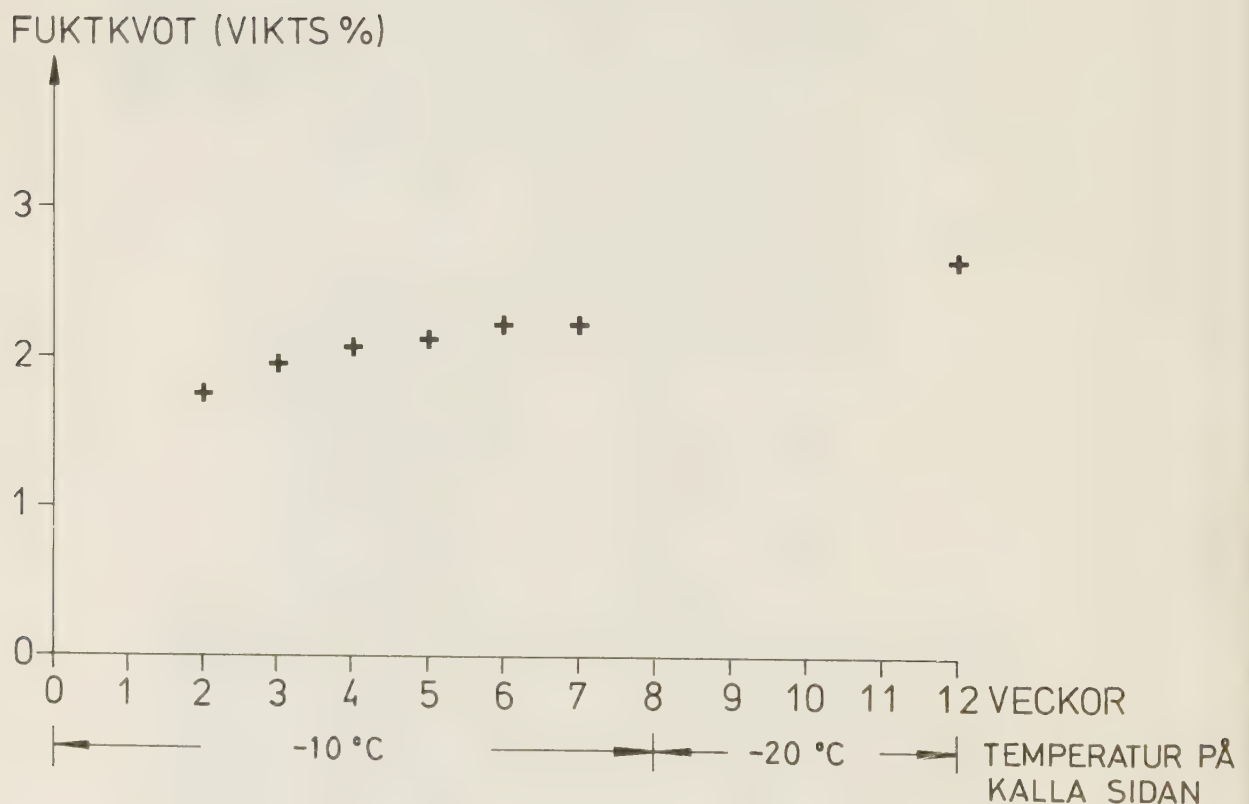


FIG 5.31. Uppmätta värden på brukets fuktkvot vid fönstersmygen i tegelväggen. 10 cm invändig tilläggsisolering.

Även i övrigt har fuktkvoterna ökat, speciellt i inre delen av tegelväggen, dvs närmast isoleringen. Värdena ligger dock vid undre gränsen av fuktgivarnas kalibreringsområde och redovisas därför inte.

Mätningar med luftfuktighetsmätare gjordes efter sex veckor och efter tolv veckor efter försökets början. Varje mätning gjordes i tre punkter

i båda väggarna.

Efter avslutat försök med 10 cm isolering torkades väggen ut genom ventilation och temperaturhöjning i klimatrummen till 30 °C under fyra veckor. Därefter isolerades väggen invändigt. Försöket pågick sedan i åtta veckor, fyra veckor då temperaturen på kalla sidan var -10 °C och fyra veckor då den var -20 °C.

Då försöket avslutades och isoleringen togs bort fanns det kraftig isbildning på tegelväggens insida. I fönstersmygen i tegelväggen började kondensation då fönstersmygsisolering gjordes, efter två veckor med -10 °C på kalla sidan. Fönstersmygsisoleringen togs bort efter fyra veckor. Temperaturen på kalla sidan hade då varit -20 °C under de senaste två veckorna. Isbildningen var kraftig och försvann inte i nedre delen av smygen under återstoden av försöksperioden. Någon tendens till kraftigare kondensation på de målade ytorna gick inte att urskilja.

På gasbetongens insida fanns vid försökets slut ett mycket tunt isskikt. Detta förekom både på de målade och omålade ytorna. Kondensation i fönstersmygen förekom inte. I eldosan på gasbetongväggens insida fanns relativt kraftig isbildning.

Relativa fuktigheten i väggen mättes efter avslutat uttorkningsskede och då försöket avslutades.

Isolering med 15 cm mineralull gjordes något dygn efter avslutat försök med 5 cm mineralull, då isbildning hade försvunnit från ytorna. Isoleringen satt sedan på väggen åtta veckor, fyra veckor med -10 °C och fyra veckor med -20 °C på kalla sidan. Efter två veckor gjordes fönstersmygsisolering med 2 x 13 mm board. Denna satt på i fyra veckor. Då fönstersmygsisoleringen togs bort fanns mycket kraftig isbildning vid smygen i tegelväggen. Vid smygen i gasbetongväggen fanns en mycket tunn isbildning i närheten av nedre hörnen. De sista två veckorna av försöket fanns ingen fönstersmygsisolering och temperaturen på kalla sidan var -20 °C. Isbildning på träfiberskivan, som utgjorde beklädnad i fönstersmygen, började då vid tegelväggen, ej vid gasbetongväggen.

Då isoleringen efter avslutat försök togs bort fanns isbildning på båda väggarna, dock betydligt kraftigare på tegelväggen än på gasbetongväggen.

I TAB 5.2 har gjorts en sammanställning av de värden som erhållits under försökens gång, vid mätningar av relativa fuktigheten i väggen.

TABELL 5.2. Mätningar av relativa fuktigheten i tegel- och gasbetongvägg vid försök med invändig tilläggsisolering.

1 = mätning i väggens inre tredjedelpunkt

2 = mätning i väggens centrum

3 = mätning i väggens yttre tredjedelpunkt

	Gasbetong			Tegel		
	1	2	3	1	2	3
<u>10 cm isolering</u>						
efter 6 veckor	72%	71%	70%	>95%	91%	85%
efter 12 veckor	>95%	88%	88%	>95%	>95%	91%
<u>Uttorkning utan</u>						
<u>isolering</u>						
efter 4 veckor	52%	55%	50%	65%	73%	-
<u>5 cm isolering</u>						
efter 8 veckor	68%	63%	63%	>95%	89%	-
<u>15 cm isolering</u>						
efter 8 veckor	>95%	>95%	88%	>95%	>95%	-

Fuktgivarna i bruket har visat en tydlig tendens till uttorkning under uttorkningsperioden och uppfuktning under perioden med invändig isolering. I fönstersmygen har denna tendens varit speciellt kraftig. Under uttorkningen sjönk uppmätt fuktkvot i bruket i fönstersmygen från 2,7% till 1,8%. Vid slutet av isoleringsperioden hade den stigit till 2,5%.

5.5 DISKUSSION

Att jämföra uppmätta temperaturförhållanden vid köldbryggor med datorberäkningar är intressant, men vanskligt. Materialens värmeledningstal varierar under inflytande av varierande temperatur och fukthalt. Kondensation och avdunstning påverkar temperaturen. Värmeövergångskoefficienterna förändras vid ändrad isolergrad och geometri. Dimensionsavvikelser, tredimen-

sionella effekter och onoggrannhet hos mätutrustningen inverkar också.

Avvikelserna mellan uppmätta och teoretiskt beräknade resultat är i vissa fall stora. Då resultat vid varierande invändig isolering jämförs fås visserligen samma tendens som vid datorberäkningar men enskilda mätvärden kan avvika ganska mycket från förväntade. Resultaten antyder att förhållandena är mycket känsliga för utförandet.

Fönstersmygar kan vara kraftiga köldbryggor med låga yttemperaturer efter tilläggsisolering. Det förefaller som om fönstersmygsisoleringar behöver vara ganska kraftiga för att ha någon avsevärd inverkan på yttemperaturen i smygen, i motsats till resultaten från datorberäkningarna. Underlaget för att säga detta är dock ganska litet eftersom mätningar med relativt tunn fönstersmygsisolering endast gjorts vid ett tillfälle (se FIG 5.18 och 5.20).

För att ytkondensation i fönstersmygar skall förekomma krävs ganska stränga klimatförhållanden, mycket låg utetemperatur, ganska högt fukttillskott inomhus, tjock invändig isolering och en befintlig konstruktion med låg värmeisoleringsförmåga och ogynnsamt utformad smyg. Risken för ytkondensation på fönster är större vid dessa förhållanden. Det är tänkbart att ytkondensation på fönster kan bli vanligare då smygdjupen ökar, dels på grund av mera ogynnsamma värmeövergångsförhållanden, dels på grund av att eventuella radiatorer kommer att sitta längre ifrån fönsterytan och den positiva effekten av varmluft förbi fönstret därmed kanske blir mindre.

Diffusion in genom fönstersmygsytor och kondensation i befintlig vägg kan förekomma. Detta avhjälpas bäst genom att dra ångspärren in över dessa ytor och täta den mot fönstret. Kondensationen behöver emellertid inte vara farlig om uttorkning kan ske utåt eller inåt under vissa tidsperioder, och materialen klarar den ökade fuktbelastningen.

Luftfuktighetsmätningarna i väggen visar att kondensation förekommer i invändigt tilläggsisolerade väggar utan ångspärr, vilket inte på något sätt är förvånande. Fuktinnehållets utveckling i väggarna har inte kunnat följas med någon större säkerhet beroende på begränsningar hos tillgängliga mätmetoder.

6 SLAGREGNETS INVERKAN PÅ FUKTTILLSTANDET OCH RISKEN FÖR FROSTSKADOR I TILLÄGGSISOLERADE YTTERVÄGGAR

6.1 INLEDNING

Frostskador i en byggnadsdel kan inträffa vid kombination av högt vatteninnehåll och temperatur under fryspunkten. Invändig tilläggsisolering av en befintlig byggnadsdel inverkar genom att byggnadsdelens temperatur sjunker. Detta medför att det finns större risk för temperatur under fryspunkten i själva konstruktionen och att uttorkning av tillförd fukt går långsammare.

Om frostbeständigheten hos en byggnadsdel kan betraktas som sammansatt av materialegenskaper och klimatförutsättningar kan tilläggsisoleringen tänkas påverka frostbeständigheten genom att klimatförutsättningarna blir strängare.

Det fortsatta resonemanget begränsas, av praktiska skäl, till ytterväggar.

Av fuktkällorna behandlas endast slagregnet. Markfukt och läckage kan också ge upphov till höga fukttillstånd med frostskador som följd. När det gäller kondensation är de fuktmängder som kan kondensera vid normala ute- och inneklimat små jämfört med möjliga slagregnsmängder.

De klimatsituationer som kan ge risk för frostskador kan delas in i två typer. Den ena är när utetemperaturen sjunker mycket snabbt efter ett kraftigt slagregn. Sådana situationer är sällsynta, men förekommer. Härvid har väggens värmestånd knappast någon betydelse. Fasadmaterialets eller -materialkombinationens egenskaper bestämmer frostbeständigheten.

Man kan också tänka sig en situation med upprepade slagregn och utetemperatur som pendlar ganska långsamt i närheten av fryspunkten. I detta fall kan den temperatursänkning och minskade uttorkning som invändig tilläggsisolering ger påverka risken för frostskador.

Då slagregnet träffar en kapillärsugande fasad sugas det in i väggen. En vattenfront, där fukthalten är lika med den kritiska fukthalten (enligt Vos) vandrar inåt. Då insugningshastigheten blir mindre än slagregnsintensiteten rinner vatten nerför fasaden och kan rinna in i sprickor.

Tiden till vattenfilmbildning är i allmänhet ganska lång för de flesta tegelkvaliteter vid måttliga slagregn, storleksordningen några timmar. Ett långvarigt slagregn med måttlig intensitet ger större fukthalt i väggen än ett kortvarigt, intensivt slagregn. Den förhållandevis snabba fukttransporten inåt medför att tjockleken hos det kapillärsugande skiktet har stor betydelse för risken för frostsador. I en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg kan tillförd fukt fördela sig på en 3 ggr så stor volym som i ett $\frac{1}{2}$ -stens tegelskal.

Slagregnet fördelar sig mycket ojämnt över en byggnads fasader. Man vet idag mycket lite om fasadslagregnets storlek. Detta gäller i ännu högre grad för kombinationen slagregn och utetemperatur under 0°C .

Som exempel på sambandet mellan regn (slagregn) och utetemperatur har gjorts en beräkning med det danska referensåret som underlag. Referensåret beskrivs av Andersen et al (1974). Det är sammansatt av s k typiska månader valda från åren 1959 - 69. Ett stort antal väderdata har registrerats varje timme. Nederbörd har endast mätts kl 7 och 19 varje dygn. Den uppmätta nederbörden har ackumulerats under hela 12-timmarsperioden. Av parametrarna som beskriver vädret och vädrets förlopp varje timme får man information om typen av nederbörd och när nederbörd faller.

Den utvärdering som gjorts har avsett slagregn, dvs regn och vind, kopplat till den lägsta utetemperatur som förekommit sedan regnets början och hela 12-timmarsperioden efter regnets slut. Tillfällen då nederbörd fallit som snö har sorterats bort. För att räkna ut slagregnet har medelvärdet av uppmätt vindhastighet under de timmar då vädret varit "regnigt" använts. Slagregnsmängden har beräknats som

$$S = u_{\text{medel}} \cdot N \cdot k$$

u_{medel} = vindhastighetens medelvärde under tillfällen med regn, (m/s)

N = nederbörds-mängden (regn), (kg/m^2)

k = konstant som valts till 0,156 (enl Hoppestad (1955))

I TAB 6.1 har mängderna regn och slagregn, beräknat enligt ovan, summerats inom olika klasser för lägsta utetemperatur. Totalt faller 34 mm regn, 7% av totala regnmängden, i samband med temperaturer under 0°C .

FIG 6.1 visar den relativa frekvensen av regntillfällen, uppdelade efter

lägsta utetemperaturen under själva regnet eller inom 12-timmarsperioden efter regnets slut. Indelningen är finast vid de låga utetemperaturerna eftersom detta område är intressantast.

TABELL 6.1. Regnmängder och beräknade slagregnmängder från det danska referensåret, indelade efter lägsta temperatur under eller strax efter regnet.

Lägsta utetemp. under eller strax efter regn ($^{\circ}\text{C}$)	Regn (mm)	Slagregn (mm)	Frekvens av regn (%)	Frekvens av slagregn (%)
≤ 3	0,0	0,0	0,0	0,0
-2,9 - -2,0	9,7	12,4	2,0	3,5
-1,9 - -1,0	3,1	2,1	0,6	0,5
-0,9 - 0,0	21,2	21,1	4,4	5,9
0,1 - 1,0	22,6	17,9	4,7	5,0
1,1 - 2,0	27,0	21,5	5,6	6,0
2,1 - 4,0	48,5	46,8	10,1	13,0
4,1 - 6,0	15,3	17,0	3,2	4,7
6,1 - 8,0	17,4	17,7	3,6	4,9
8,1 - 10,0	50,1	39,0	10,4	10,9
10,1 - 15,0	219,4	151,2	45,7	42,1
$\geq 15,1$	45,4	12,2	9,5	3,4
SUMMA	479,7	358,9	100,0	100,0

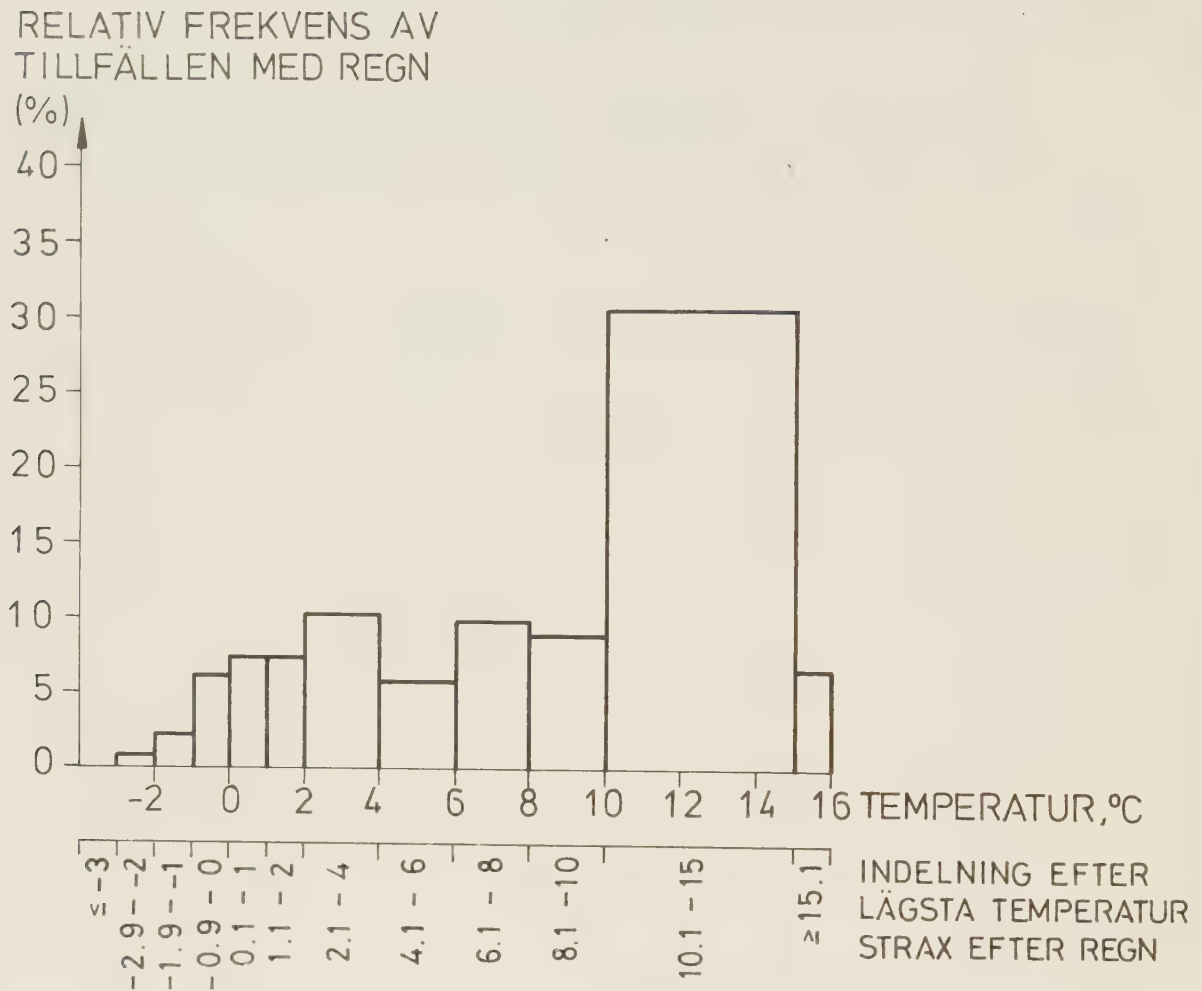


FIG 6.1. Antal tillfällen med regn indelade efter lägsta utetemperatur under eller strax efter regnet.

Kraftiga regn strax före frysning förefaller vara en ovanlig kombination.

Eftersom slagregnet transporteras in i väggen som en vattenfront med kritiska fukthalten w_k har förhållandet mellan w_k och kritiska vatteninnehållet för frostsador stor betydelse. För bekvämlighets skull kallas det senare för w_{KR} uttryckt som fukthalt, u_{KR} uttryckt som fuktkvot och S_{KR} uttryckt som vattenmättnadsgrad. Fagerlund använder S_{KR} eller u_{KR} . Risken för frostsador är stor om w_{KR} ligger i närheten av w_k . I TAB 6.2 visas värden på kritiska fuktkvoten för några tegel- och gasbetongkvaliteter, uppmätta av Fagerlund (1972).

TABELL 6.2. Kritisk fuktkvot för några tegel- och gasbetongkvaliteter.
Bestämda av Fagerlund, (1972).

Material	γ (kg/m ³)	u_{KR} (%)	S_{KR}	$w_{KR}(=\gamma \cdot u_{KR})$ (kg/m ³)
Lösbränt tegel	1690			
30 x 30 x 120		19,6	0,84	331
40 x 40 x 120		20,3	0,87	343
Hårdbränt tegel	1860			
30 x 30 x 120		12,5	0,75	233
40 x 40 x 120		13,4	0,80	249
Gittertegel				
yttre del	1990	10,1	0,81	201
inre del	2000	10,7	0,87	214
Månstörpsgavlar				
1500-tals tegel	1810	<10,8	<0,60	195
1930-tals tegel	2080	6,7	0,67	139
1960-tals tegel	1880	10,7	0,74	201
Gasbetong				
typ 1	502	74,4	0,43	373
typ 2	572	62,7	0,40	359
typ 3	516	62,6	0,35	323
typ 4	532	62,6	0,40	333

Vos (1967) anger som försöksresultat $w_k = 60 \text{ kg/m}^3$ för tegel (1800 kg/m^3) och $w_k = 180 \text{ kg/m}^3$ för gasbetong. Bomberg (1974) har som försöksresultat fått w_k ca $100 - 150 \text{ kg/m}^3$ för tegel.

Då man har en kombination av olika material, en putsad tegel- eller gasbetongvägg, blir fukttransporten in i väggen mera komplicerad. Fukttransport i putsade väggar har undersökts av Sandin (1976, 1978). Av avgörande betydelse är porstrukturen hos de olika materialen. Ett finporöst material kan suga vatten från ett grovporöst, men inte tvärtom. I fallet KC-puts på gasbetong suger gasbetongen in allt vatten som träffar putsen tills denna är mättad. Uttorkningen sker sedan som diffusion genom putsen. KC-puts på tegel ligger närmare kombinationen finporöst ytskikt på grovporöst underlag. Härvid absorberar putsen slagregnet. Då putsen är

mättad kan teglet börja suga vatten från vattenfilmen på ytan. Vid uttorkningen torkar först putsen ut. Därefter kan putsen suga tillbaka vatten från underlaget. I det senare fallet skyddar putsen underlaget. I det förra fallet blir effekten försämrad uttorkning.

Vid frostskador på materialkombinationer sker sönderfrysningen ofta vid gränsen mellan materialen. Detta antas bero på att vatten kan pressas in i det grovporösa materialet från det finporösa, varvid kritiska vatteninnehållet minskar lokalt här.

Underlag för bedömning av frostbeständigheten för material i naturligt klimat finns inte. Både klimatförutsättningar och materialegenskaper är för dåligt kända för detta. I fortsättningen begränsas diskussionen till tilläggsisoleringens inverkan på temperaturförhållanden och uttorkning efter slagregn.

6.2 UTTORKNING EFTER SLAGREGN

I detta avsnitt redovisas några jämförande beräkningar av uttorkning efter slagregn för oisolerade och invändigt tilläggsisolerade ytterväggar. De väggtyper som behandlas är oputsade tegelväggar och utvändigt putsade gasbetongväggar.

De flesta beräkningarna har gjorts med konstanta randvillkor. Avsikten med dessa beräkningar har varit att renodlat studera olika faktorerers inverkan på uttorkningshastigheten. En viss slagregnsmängd har förutsatts belasta väggen vid beräkningens början. Läget för en vattenfront i väggen har bestämts med antagande om kritiska fukthalten, w_k . Från detta begynnelsestillstånd har uttorkning antagits börja omedelbart och fortgå under oförändrade klimatförhållanden. Fuktflödet har beskrivits med ekvationen

$$g = - \delta \cdot \frac{dv}{dx} - k \cdot \frac{dw}{dx}$$

vilken har lösts med en differensmetod.

Några beräkningar av uttorkningen under naturliga klimatförhållanden har gjorts med Sandbergs datorprogram (Sandberg 1973).

Tilläggsisoleringens inverkan har i alla beräkningar approximerats med ett invändigt värmeövergångsmotstånd. Värmeledningstalet för isoleringsmaterialet har förutsatts vara 0,04 W/mK, så att det fiktiva inre värmeövergångsmotståndet för d m tilläggsisolering är

$$m_i = 0,20 + \frac{d}{0,04}$$

6.2.1 Oputsad tegelvägg

För den oputsade tegelväggen har generellt antagits att allt regn som träffar fasaden sugas in i väggen. Materialdata för teglet har, om inget annat sägs, antagits som i KAP 4.4.3. Värmeledningstalet har dock satts lika med 0,60 W/mK i beräkningarna med stationära temperaturförhållanden.

Diffusionsövergångskoefficienten på utsidan, β_u , har satts till $17 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Avdunstningen medför att väggens temperatur sjunker. Detta har inte tagits hänsyn till i beräkningarna. Inverkan diskuteras något i KAP 6.3.

Då slagregnet slutat sker uttorkningen till en början som diffusion från ytan enligt

$$g = \beta_u (v_{sy} - v_u)$$

g = fuktflödet från ytan ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

v_{sy} , v_u = mättnadsånghalten vid ytan respektive ånghalten ute (kg/m^3)

Fukthalten i ytan sjunker snabbt, och en fas med långsammare uttorkning tar vid.

I uttorkningens första fas är ytemperaturen och diffusionsövergångskoefficienten alltså bestämmande för uttorkningshastigheten. I FIG 6.2 visas inverkan av invändig tilläggsisolering på ytemperaturen på en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg. Klimatet är några vinterdygn med ekvivalent utetemperatur gällande för Stockholm enligt Sandberg (1973). Väggen har antagits vetta mot söder och dess absorption för solstrålning har satts till 0,7. Under det mulna dygnet består instrålningen endast av diffus strålning, ca 25% av den totalstrålning som erhålls en klar dag. Halvmulna dagar reduceras den direkta solstrålningen med 50% och den diffusa med hänsyn till solhöjden.

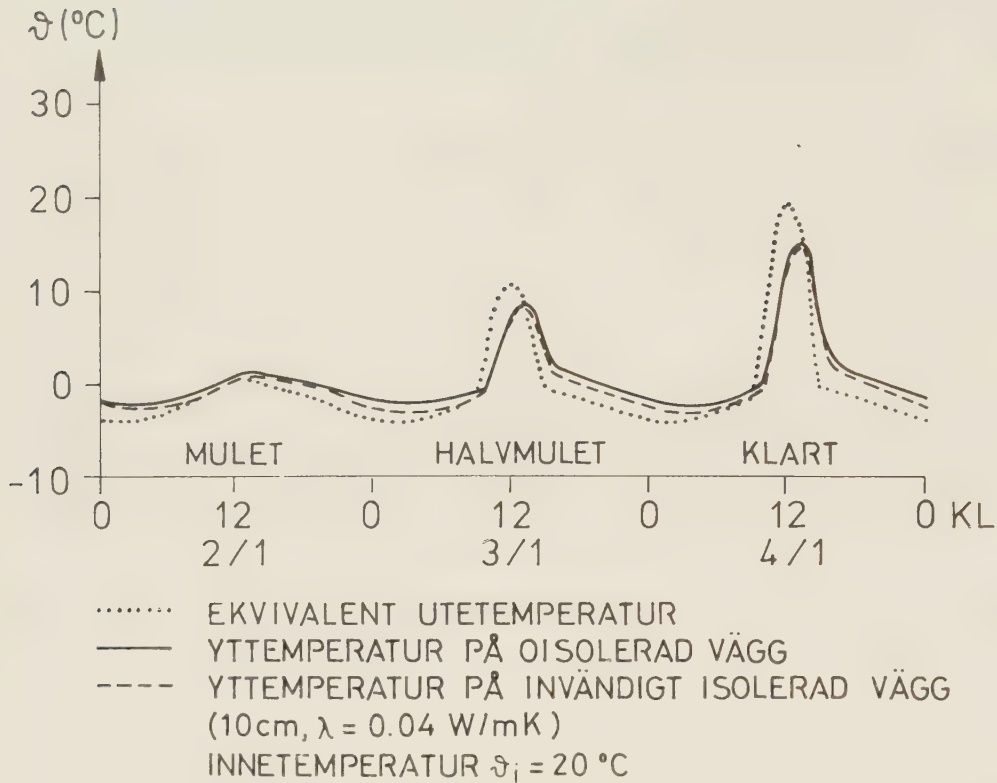
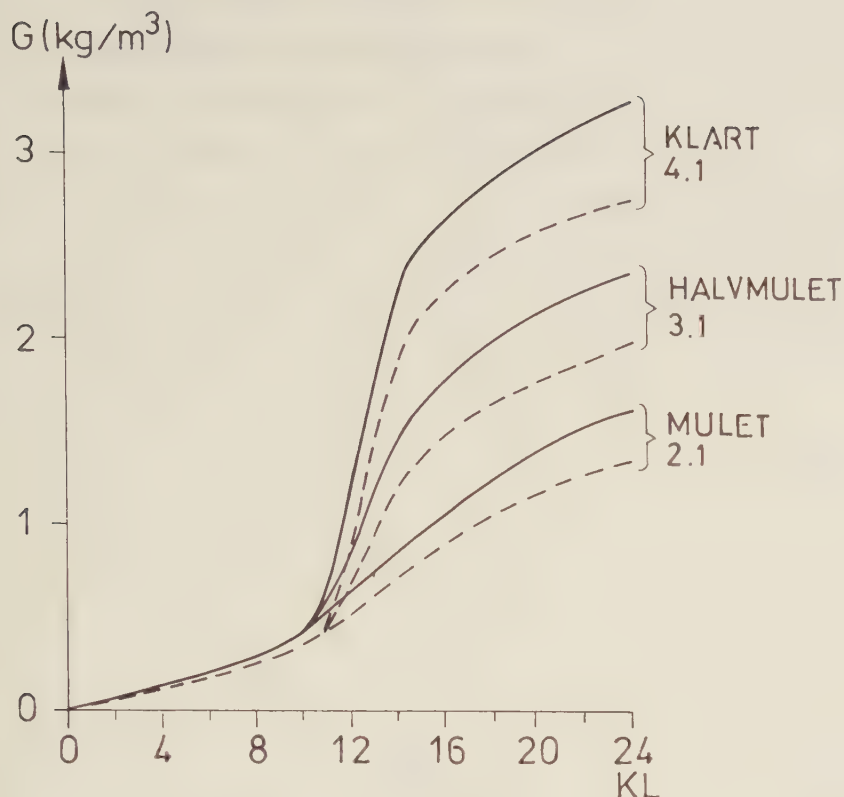


FIG 6.2. Beräknad yttemperatur på oisolerad och invändigt tilläggsisolerad vägg under några vinterdygn. Stockholm, södervägg.

Den invändigt isolerade väggens yttemperatur ligger, vid dessa klimatförhållanden ca $0,5 - 1^{\circ}\text{C}$ under den oisolerade väggens. Inverkan på uttorkningshastigheten i första skedet, det vill säga från ytan, visas i FIG 6.3. Den mängd fukt som kan torka ut under de olika dygnen har beräknats vid yttemperaturförloppen i FIG 6.2. Ånghalten ute har satts konstant lika med $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.



—— 1 1/2-STENS TEGELVÄGG UTAN TILLÄGGSISOLERING
 ---- 1 1/2-STENS TEGELVÄGG MED 10cm INV. ISOLERING

FIG 6.3. Möjlig uttorkad mängd från ytterväggsyta med temperaturförlopp enligt FIG 6.2. Första fasen av uttorkningsskedet.

Man kan dra två slutsatser av FIG 6.3. Den ena är att klimatförutsättningarna, i detta fall strålningen, kan ha betydligt större inverkan än tilläggsisoleringen på uttorkningen, det vill säga väggens fuktbalans. Den andra är att väggens fukthinnehåll vid ytan måste påverkas av tilläggsisoleringen, eftersom uttorkad mängd, i FIG 6.3, endast är ca 85% av vad den är utan tilläggsisolering. Fukthalten i ytan kommer att sjunka något långsammare jämfört med förhållandena före tilläggsisolering. I ogynnsamma fall, när utetemperaturen sjunker snabbt efter ett slagregn, skulle detta kunna medföra ökad risk för frostsador.

I FIG 6.4 visas en numerisk beräkning av uttorkning från en mycket hög begynnelsefukthalt, 110 kg/m^3 . För att höja fukthalten i väggen så mycket från 10 kg/m^3 behövs ett fasadslagregn på 38 mm som helt sugs in i väggen.

Detta ligger dock i närheten av vad som i kommentaren till SBN 1975:3 anges kunna vara maximalt dygnsvärde i landets mest slagregnsbelastade zon, reducerat med 50%. Det inressanta i figuren är hur snabbt fukthalten i ytterytan sjunker i de två fallen. Utetemperaturen är konstant lika med 0°C , innetemperaturen 20°C . Inget fuktutbyte antas kunna ske med inne-luften ($\beta_i = 0$). Efter 1 dygn har ytans fukthalt sjunkit från 110 till 39 kg/m^3 i det oisolerade fallet och till 56 kg/m^3 i det isolerade fallet. Uttorkningen inne i materialet går mycket långsamt i båda fallen.

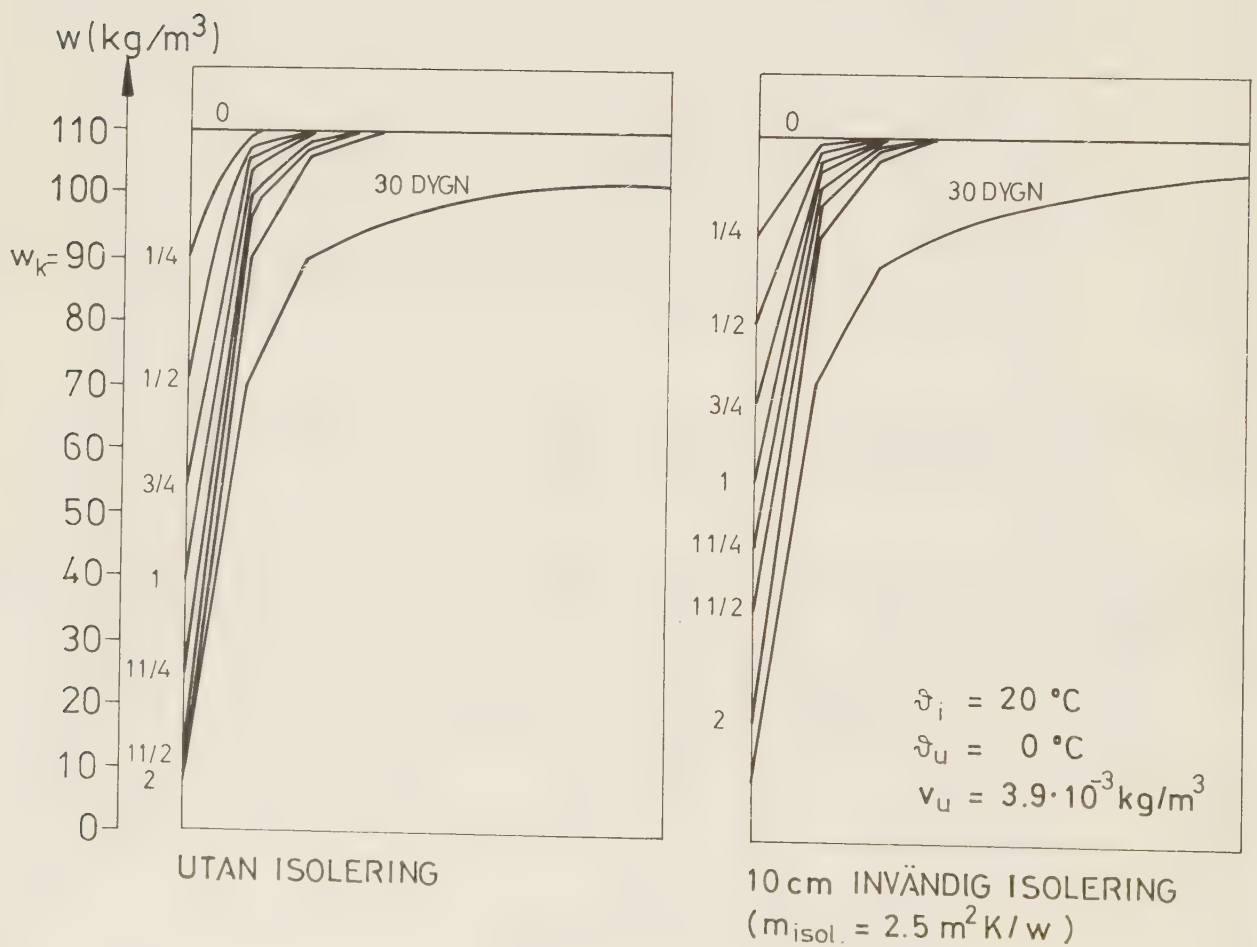


FIG 6.4. Beräknad uttorkning för $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg med och utan invändig tilläggsisolering.

I FIG 6.5 visas några beräkningar för ett mindre slagregn, 5 mm på väggen. Fukthalten före slagregnet har satts till 8 kg/m^3 . Inget fuktutbyte med inneluften antas ske. I de två övre figurerna är förutsättningarna samma som i FIG 6.4. För fallet med 10 cm invändig tilläggsisolering har också beräknats inverkan av 3°C högre utetemperatur, samt inverkan av något högre kapillärledningskoefficient, $k = 0,002 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ då $w < 90 \text{ kg/m}^3$. Den höjda kapillärledningskoefficienten inverkar på totalt uttorkad mängd i början av förloppet, men medför också att större transport i vätskefas kan ske mot väggens insida.

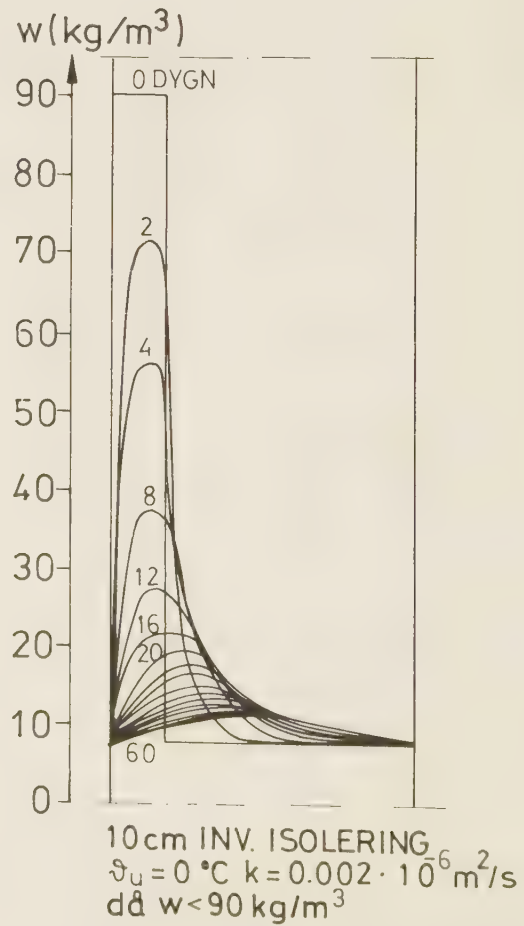
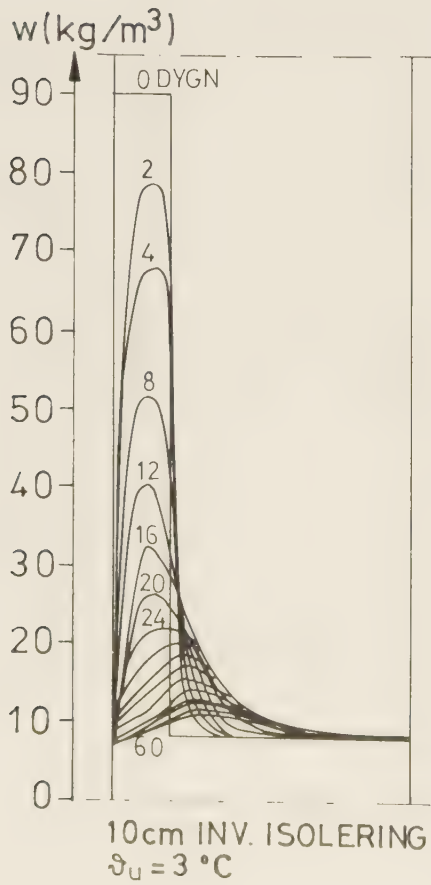
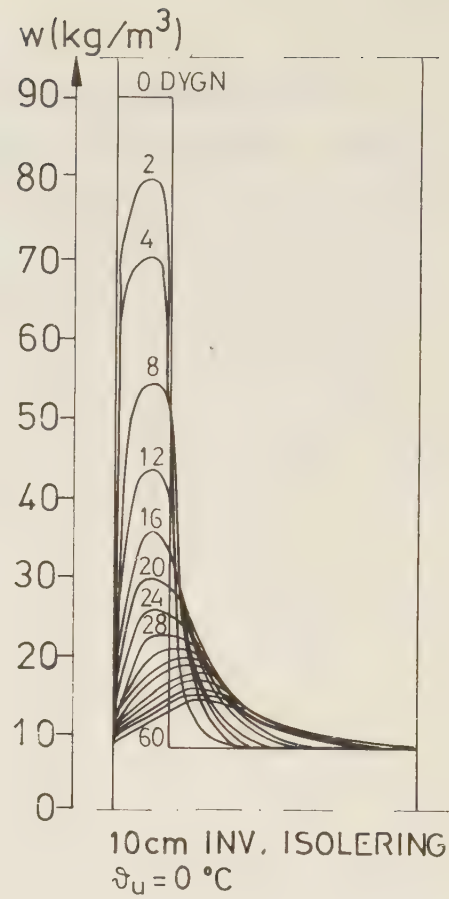
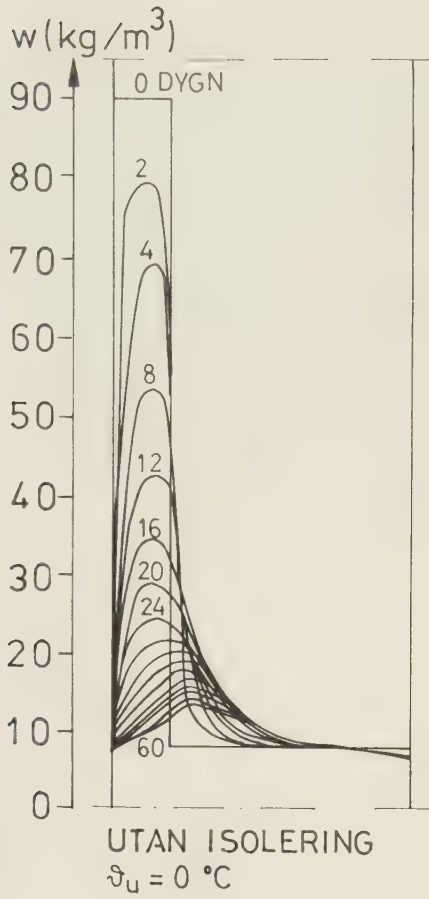


FIG 6.5. Uttorkning av 5 mm slagregn på 1 1/2-stens tegelvägg. Beräkningar vid konstanta klimatförhållanden.

Då väggen är invändigt isolerad kan fukten transporteras mot väggens insida genom diffusion. Detta motverkas i det oisolerade fallet av den stora temperaturgradienten över väggen.

I FIG 6.6 och 6.7 visas beräkningar gjorda med Sandbergs program. Klimatet är Lund. Väggen i FIG 6.6 träffas av 5 st små slagregn under hösten. Förhållandena i oisolerad och invändigt isolerad vägg har beräknats utan strålning och med strålning som för en södervägg. Strålningens inverkan är mycket stor. Skillnaden mellan isolerad och oisolerad vägg är liten med strålning på väggen, betydligt större utan strålning. Väsentligt för fuktbalansen är, att fuktutbyte med inneluften antas förekomma. Då väggens inre delar börjar fyllas upp av slagregnet finns ånghaltsskillnad mellan väggen och rumsluften i det oisolerade fallet. Vid invändig isolering är temperaturskillnaden mellan vägg och rumsluft för stor för att tillåta någon diffusion inåt. Detta framgår speciellt av FIG 6.7, där fukthaltsfördelningen vid en tidpunkt lagts in. I detta fall är det totala fasadslagregnet mycket stort, 125 mm fördelat över året på ett sätt som framgår av figuren. Den inlagda figuren visar att skillnaden mellan oisolerad och invändigt isolerad vägg till största delen beror på att isoleringen fungerar som en spärr mot uttorkning inåt.

Sammanfattningsvis kommer invändig tilläggsisolering att förändra väggens fuktbalans på följande sätt. Vid slagregn, då väggens yttre delar får hög fukthalt, kan diffusion mot väggens inre delar ske, lättare än för den oisolerade väggen. Även om ny ångspärr inte finns, försvåras uttorkningen mot rumsluften av temperaturskillnaden över isoleringen. Uttorkningen måste därför ske utåt, när klimatet och väggens fuktinnehåll tillåter detta. Motståndet mot diffusion och kapillärsugning från väggens inre delar till de yttre är stort. Den lilla temperaturgradienten minskar, i detta skede, uttorkningshastigheten något.

Upprepade slagregn medför att den isolerade väggen gradvis fylls upp till en högre nivå än den oisolerade. Detta ger ett sämre utgångsläge för uttorkningen.

Av viss betydelse är också värmeledningsförmågans ökning med ökande fukthalt. Vid de höga fukthalter som det här är fråga om är inverkan ganska stor. För den oisolerade väggen innebär detta att temperaturen stiger i

de yttre delarna. Effekten av detta på uttorkningshastigheten är mindre för den tilläggsisolerade väggen eftersom största delen av temperaturfallet fås över isoleringen.

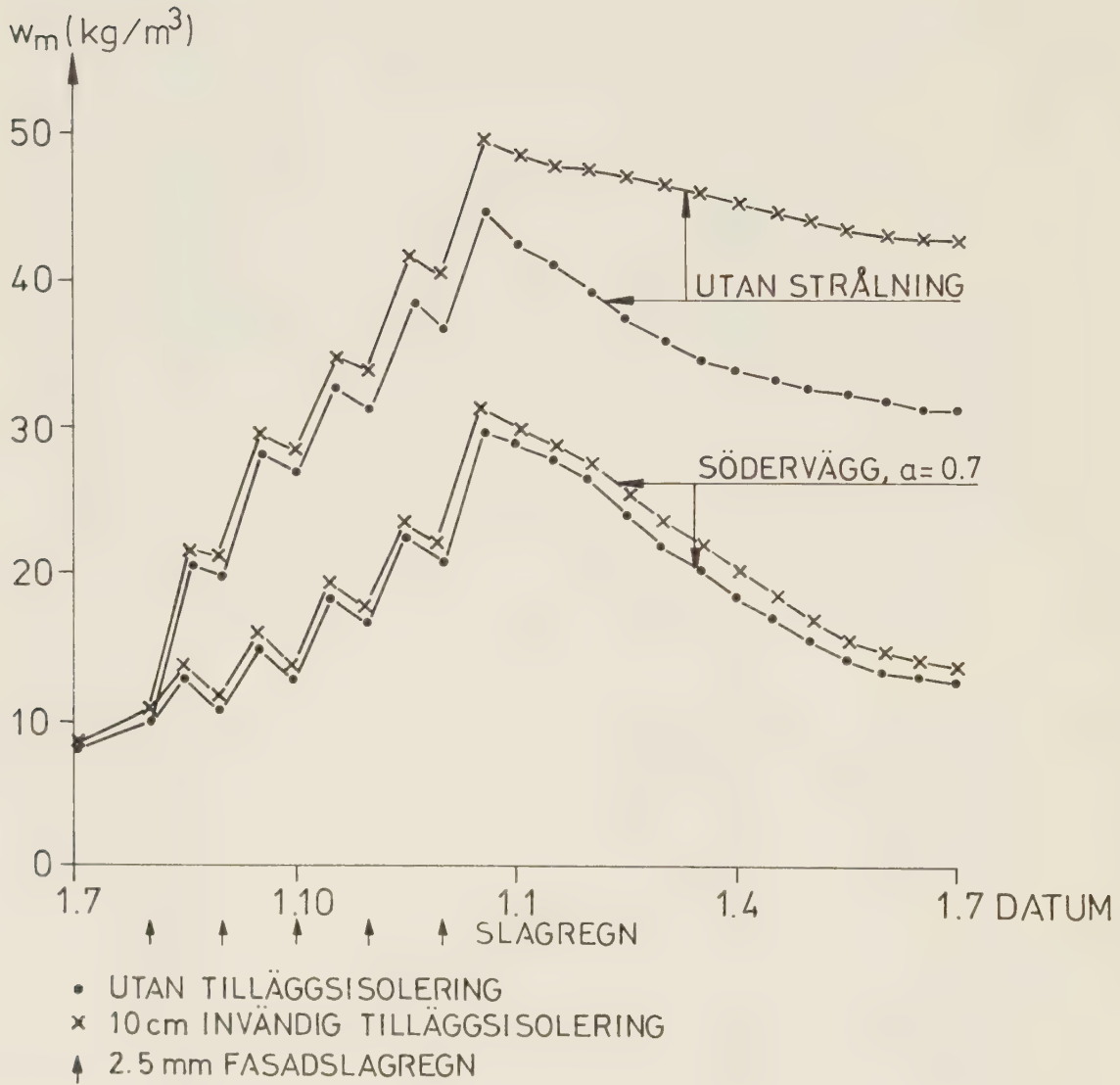


FIG 6.6. Slagregn på 1½-stens tegelvägg, Lund.

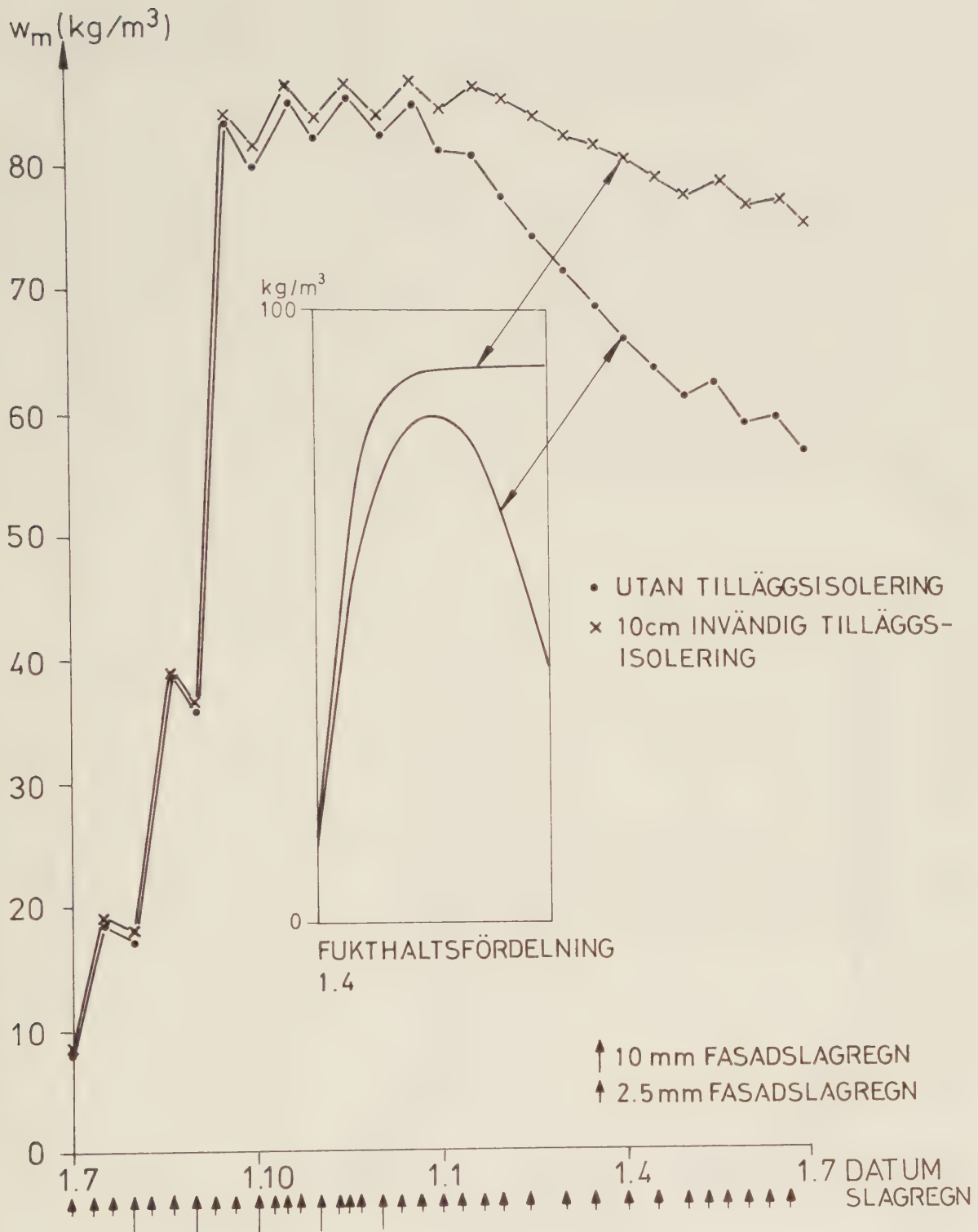


FIG 6.7. Slagregn på 1 1/2-stens tegelvägg, Lund. Utan strålning.

6.2.2 Putsad gasbetongvägg

I beräkningarna har allt slagregn som träffar gasbetongväggen antagits sugas in i gasbetongen genom putsen.

I FIG 6.8 visas en beräkning av fuktinnehållet i en 250 mm tjock gasbetongvägg med och utan invändig tilläggsisolering. Materialdata för gasbetongväggen har valts enligt KAP 4.4.4. Väggen har antagits vara utvändigt putsad med ett material som har ånggenomgångsmotståndet $0,015 \cdot 10^6 \text{ s/m}$. Detta kan motsvara 20 mm puts med ånggenomsläppligheten $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Före slagregn antas fukthalten i hela väggen vara lika med 30 kg/m^3 . 4 mm slagregn ger den fukthaltsfördelning som visas i figuren, om w_k antas vara 150 kg/m^3 . Uttorkningen fortgår därefter vid konstanta klimatförhållanden. Inget fuktutbyte med inneluften antas förekomma.

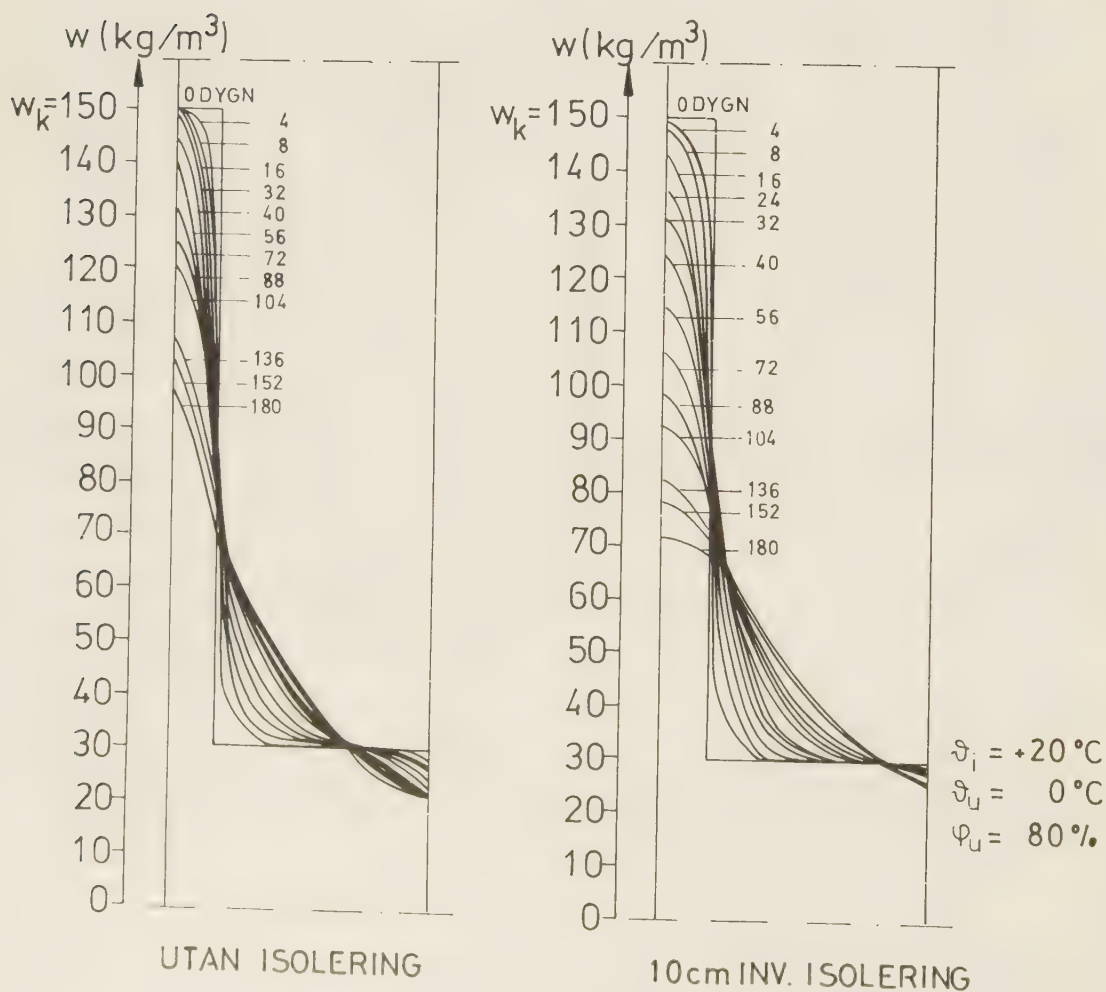


FIG 6.8. Uttorkning efter 4 mm slagregn på 250 mm gasbetongvägg med och utan invändig tilläggsisolering.

Uttorkningen går mycket långsamt. Efter ca 6 månader är fukthalten fortfarande ganska hög i gränsskiktet mellan puts och gasbetong. Den sjunker dock betydligt snabbare i den invändigt isolerade än i den oisolerade väggen. Av detta faktum kan man förledas att tro att den tilläggsisolerade väggen torkar ut snabbare. Så är emellertid inte fallet. Den oisolerade väggens jämviktsfukthalt är lägre än för det isolerade fallet. Diffusion utåt sker från den del av väggen som är närmast rumsluften. I den invändigt isolerade väggen är diffusion inåt möjlig. I praktiken kommer skillnaden mellan de två tillstånden att vara mycket liten, och det är troligt att den invändigt isolerade väggen fylls upp något snabbare eftersom den oisolerade väggen vanligtvis kan torka ut inåt. Fallet med invändig ångspärr på oisolerad stenvägg är ovanligt. En bättre uppfattning av relationen mellan de två väggarnas uttorkningshastighet får man genom att titta på hur snabbt medelfukthalten sjunker. Detta visas i FIG 6.9. Ingen märkbar skillnad finns mellan de två fallen.

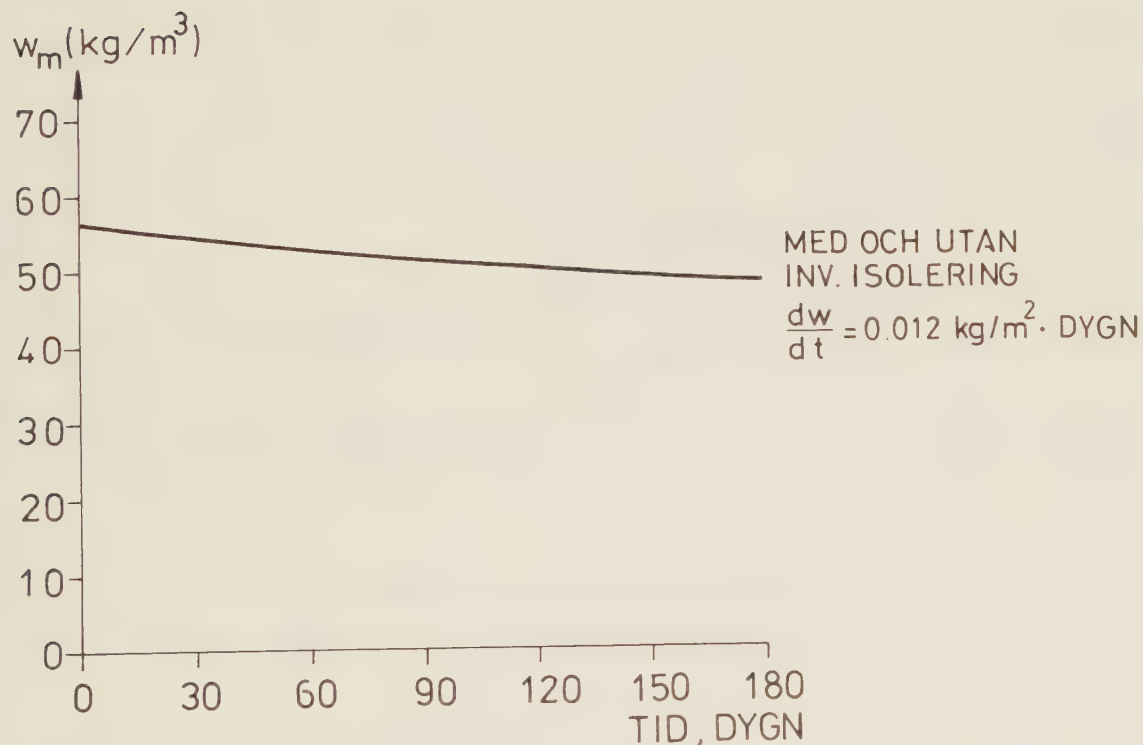


FIG 6.9. Uttorkning efter slagregn på 250 mm gasbetong. Samma fall som i FIG 6.8.

Några beräkningar för ett varierande uteklimat har också gjorts med Sandbergs datorprogram, och visas i FIG 6.10. Vid dessa beräkningar har väggen antagits träffas av endast ett, ganska litet, slagregn, 2,5 mm den 1/9. Uteklimatet är Lund. Inget fuktutbyte med inneluften sker.

Uttorkningen följs i nio månader efter regnet. Materialdata är samma som i den tidigare beräkningen och inget fuktutbyte med inneluften antas äga rum. Beräkningen är gjord för en oisolerad vägg mot norr samt för en invändigt isolerad ($m_{isol} = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$) mot norr och mot söder.

Skillnaden mellan den oisolerade och den isolerade väggen är mycket liten, men den oisolerade väggen torkar något snabbare. Som väntat går uttorkningen långsamt under vintern men betydligt snabbare under den varmare delen av året.

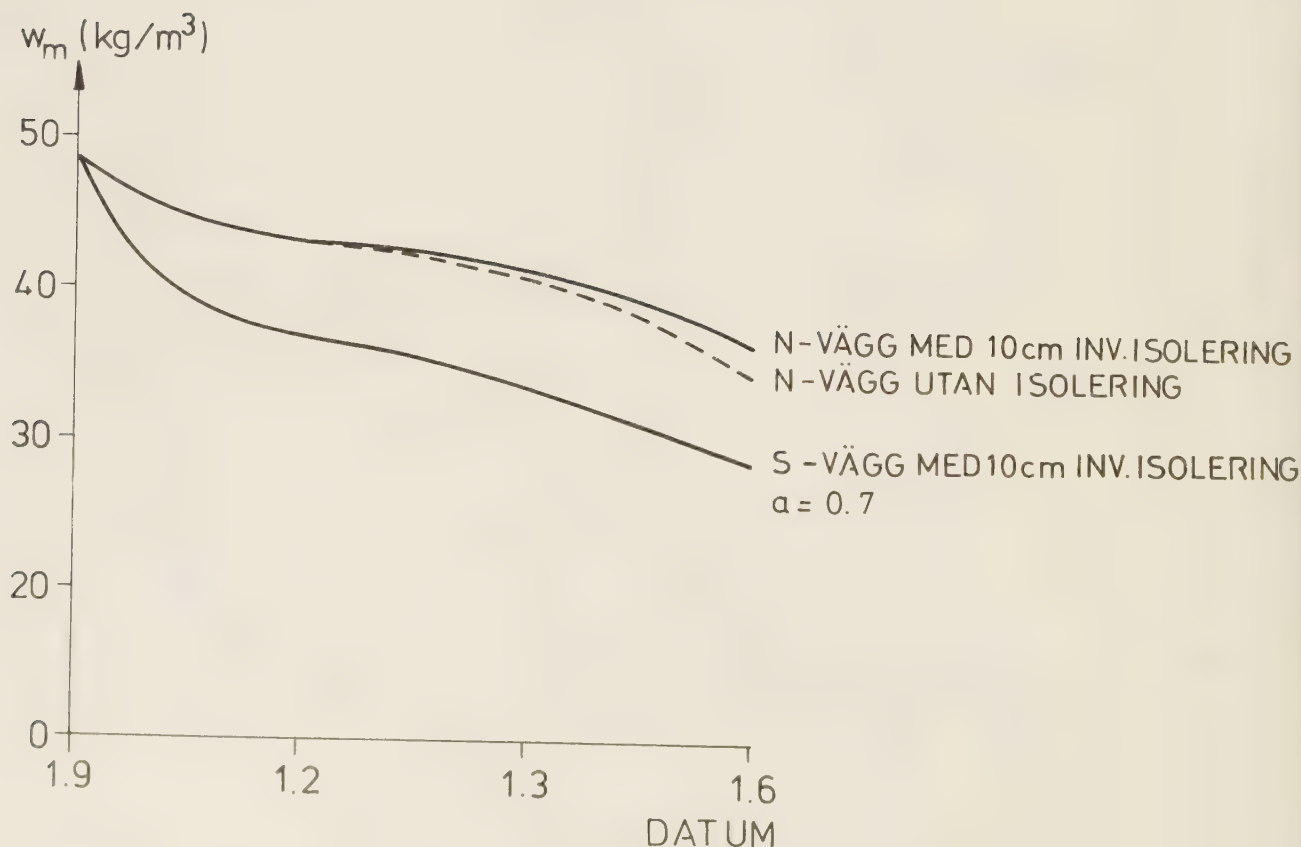


FIG 6.10. Uttorkning av 2,5 mm slagregn beräknat med Sandbergs datorprogram. Uteklimat Lund.

6.3 AVDUNSTNING VID TEMPERATURSÄNKNING

Risken för frostsador i ett fasadmateriel påverkas bland annat av hur snabbt frysning sker. Då utetemperaturen börjar sjunka ökar skillnaden mellan luft- och yttemperatur på fasaden. Om uttorkningen sker från ytan och uteluften är mättad, vilket kan vara fallet när temperaturen sjunker snabbt, ökar ånghaltsskillnaden mellan väggyta och luft. Därmed ökar också uttorkningshastigheten. Genom avdunstningen tas värme från väggen, så att yttemperaturen sjunker, vilket ökar frysrisken.

Om temperatursänkningen sker långsamt kan fukthalten i väggen eventuellt hinna sjunka under en nivå som är kritisk för frostsador innan frysning sker. Temperatursänkningshastighet i uteluft har bl a redovisats av Plum och Jessing (1965) för Danmark. Deras resultat visas i FIG 6.11.

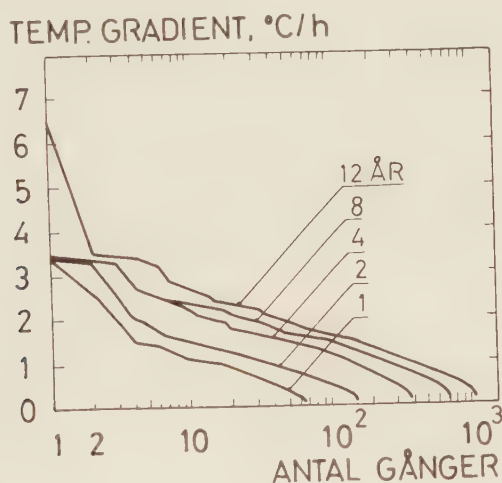


FIG 6.11. Temperatursänkningshastighet hos uteluft i Danmark enligt Plum och Jessing (1965).

För att uppskatta storleken av de fuktmängder som hinner avdunsta vid temperatursänkning har några kvantitativa beräkningar gjorts.

I FIG 6.12 visas värmebalansen för en utvändig väggyta. Kortvågig strålning mot ytan antas inte förekomma, och avdunstning sker från ytan.

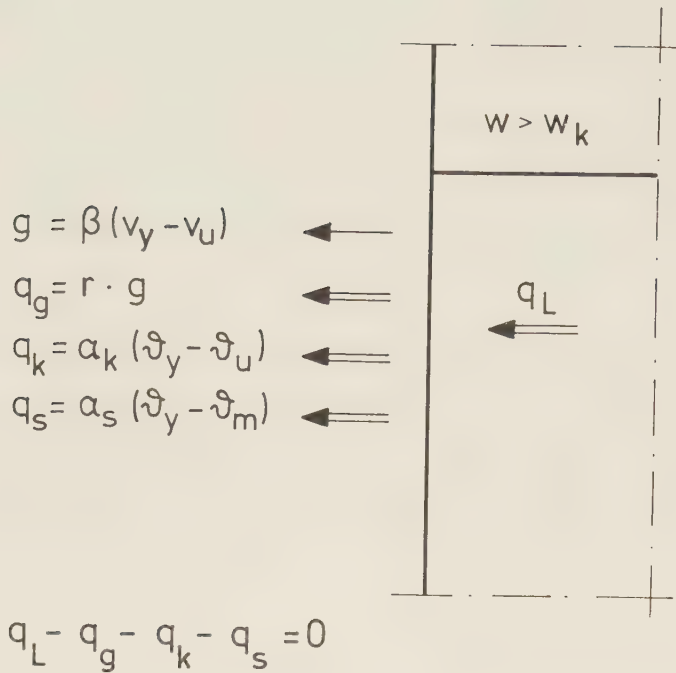


FIG 6.12. Värmebalans för yta med avdunstning.

Strålningsovergången skall relateras till den motstrålande temperaturen, ϑ_m , och inte till lufttemperaturen som ofta, lite slarvigt, görs. I beräkningarna förutsätts dessa emellertid vara lika stora.

Diffusionsövergångskoefficienten, β , kan relateras till α_k genom följande samband

$$\frac{\alpha_k}{\beta} = \rho \cdot c_p \left(\frac{a}{D}\right)^n$$

ρ = luftens densitet (kg/m^3)

c_p = luftens specifika värme (J/kg K)

a = luftens temperaturledningstal (m^2/s)

D = luftens diffusionskoefficient (m^2/s)

n = tal mellan 0 och 1

Vid turbulent strömning är $n = 0$, vilket ger

$$\frac{\alpha_k}{\beta} = \rho \cdot c_p$$

som brukar kallas Lewis lag. α_k , och därmed β , är beroende av lufthastigheten vid ytan.

Det icke stationära temperaturförloppet i en vägg vid temperatursänkning och avdunstning har beräknats numeriskt på dator. Vid förloppets början antas stationära förhållanden. Temperatursänkningen sker sedan linjärt med olika hastighet. Avdunstningen har tagits med i differensekvationen för ytskiktet. Beräkningarna har gjorts för en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg. Vid förloppets början har två olika utetemperaturer antagits, 5°C och 2°C . I första fallet har temperaturen antagits sjunka linjärt till -5°C , i andra fallet till -2°C , på 12, 6, 3 och 1 timmar. Väggen har antagits vara isolerad respektive invändigt isolerad med 10 cm mineralull ($\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$). Vid väggytan är ånghalten lika med mättnadsånghalten.

Övriga förutsättningar är:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{tegel}} &= 0,80 \text{ W/mK} && \text{(fuktigt material)} \\ (\gamma c_p)_{\text{tegel}} &= 1680 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3\text{K} && \text{(fuktigt material)} \\ r &= 2500 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \\ \alpha_i &= 8 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \alpha_k &= 22 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \alpha_s &= 4 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \beta &= 17 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \\ \phi_u &= 100\% \end{aligned}$$

I FIG 6.13 visas exempel på beräkningsresultat vid temperaturfall från 5°C till -5°C på 12 timmar, dvs temperatursänkingshastigheten $10/12 = 0,83^\circ\text{C/h}$. Yttemperaturen på ytterväggen med och utan invändig isolering ($m_{\text{isol}} = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$) redovisas. Dessutom visas uttorkningshastigheten, g , och uttorkad mängd under tidsperioden, G , fram till dess att väggens utvändiga yttemperatur blir lika med 0°C .

I TAB 6.3 har resultaten av de olika beräkningarna sammanställts. Tiden till yttemperaturen 0°C från det att lufttemperaturen är 0°C , samt uttorkad mängd från förloppets början till 0°C i ytan anges.

Ytskiktet på den invändigt isolerade väggen fryser snabbare än på den oisolerade väggen eftersom temperaturen vid förloppets början är lägre. Möjlig uttorkad mängd blir därmed mindre då väggen är invändigt isolerad. Skillnaden mellan det oisolerade och det invändigt isolerade fallet minskar dock när temperatursänkingshastigheten ökar. Inverkan på risken för frostsador är troligen ganska liten eftersom möjliga uttorkade mängder är små. För en välisolerad vägg är den möjliga positiva effekten mindre än då väggen är dåligt isolerad.

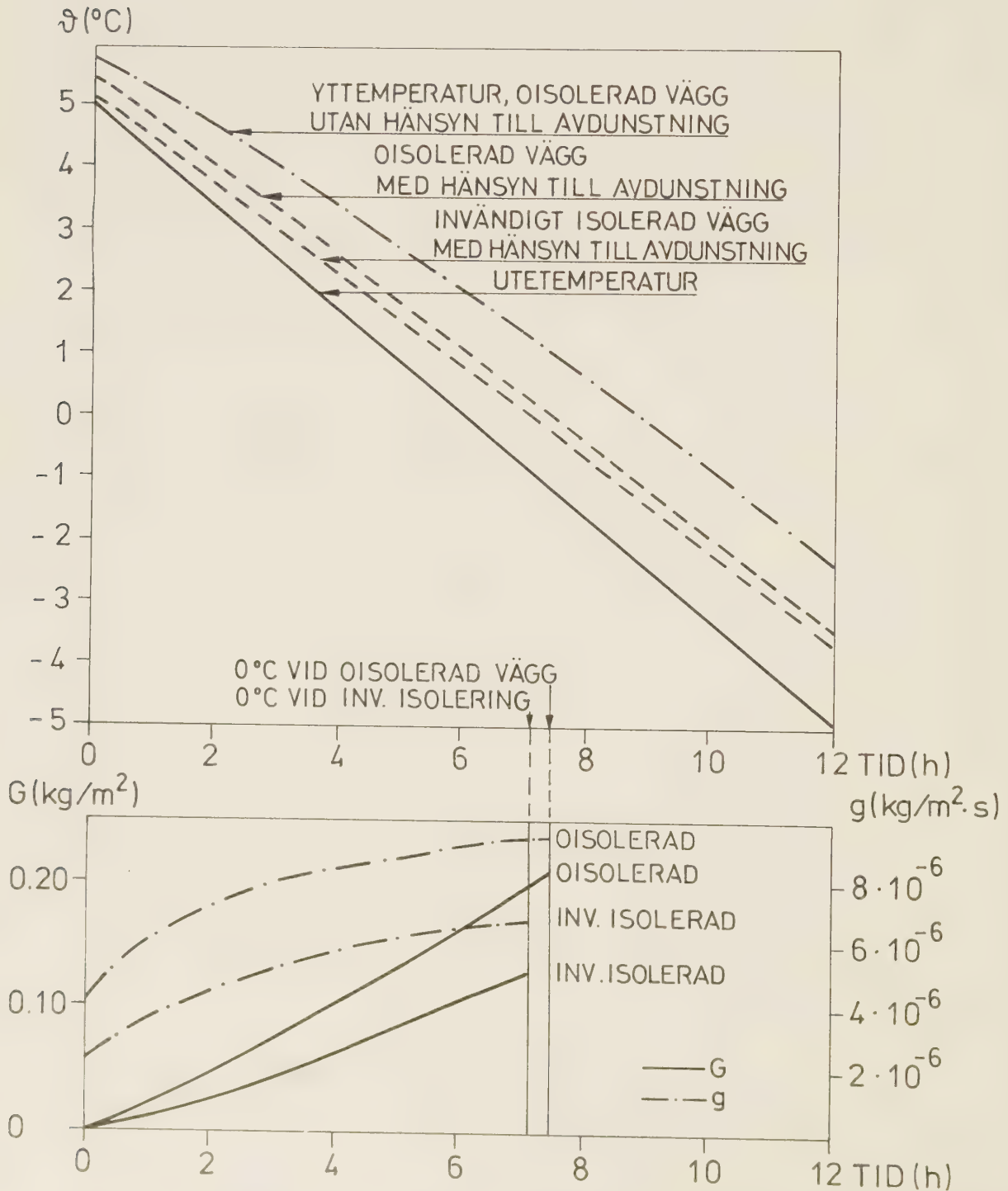


FIG 6.13. Yttemperaturförlopp och uttorkning från ytan för oisolerad och invändigt isolerad ($m_{\text{isol}}=2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$) 1 1/2-stens tegelvägg.

TABELL 6.3. Uttorkad fuktmängd, G , vid temperatursänkning hos uteluften.

$G = \int_0^{t_0} \beta (v_{sy} - v_u) dt$ där t_0 är tiden från förloppets början till yttemperaturen är 0°C .

Begynnelse- temperatur ($^\circ\text{C}$)	Temp.sänkings- hastighet ($^\circ\text{C/h}$)	Inv. isolering m_{isol} ($\text{m}^2\text{K/W}$)	Tidsfördröj- ning mellan 0°C ute och på ytan (h)	G (kg/m^2)
5	0,83	0	1,48	0,21
5	0,83	2,5	1,17	0,13
5	1,67	0	0,90	0,14
5	1,67	2,5	0,62	0,09
5	3,33	0	0,63	0,08
5	3,33	2,5	0,38	0,06
5	10	0	0,27	0,05
5	10	2,5	0,22	0,04
2	0,33	0	2,67	0,18
2	0,33	2,5	1,44	0,08
2	0,67	0	1,45	0,11
2	0,67	2,5	0,90	0,05
2	1,33	0	0,90	0,06
2	1,33	2,5	0,50	0,03
2	4	0	0,35	0,03
2	4	2,5	0,22	0,02

6.4 SIMULERING AV FROSTSKADOR

En kvantitativ uppskattning av inverkan av invändig tilläggsisolering på risken för frostskador i ett fasadmaterial kan göras genom att man definierar ett fukt- och temperaturtillstånd som ger en frostskada, skapar olika klimatsituationer och kontrollerar om dessa kan ge frostskador i en vägg med och utan tilläggsisolering.

I detta avsnitt beskrivs ett sådant förfarande. För ändamålet har skrivits ett datorprogram där fukt- och temperaturfördelningen i en konstruktion beräknas. Konstruktionen antas belastad av kraftiga och ofta återkommande slagregn.

6.4.1 Beskrivning av beräkningsförfarandet

Konstruktionen delas in i ett antal skikt. Beräkningen görs med små tidssteg. I varje tidssteg anropas subrutiner för uteluftens temperatur och ånghalt samt slagregnet. Utetemperaturen och -ånghalten kan ges godtycklig, kontinuerlig tidsvariation. Slagregnet inträffar vid diskreta tidpunkter. Dessa tidpunkter och motsvarande slagregnsmängder föreskrivs i subrutinen. Om slagregn inträffar fördelas detta i konstruktionen, först upp till kritiska fukthalten, därefter med återstående mängd jämnt utslagen på hela väggens tjocklek. Allt slagregn antas alltså absorberas av väggen. Om utetemperaturen är mindre än eller lika med 0 °C då slagregn skall inträffa sätts slagregnsmängden lika med noll. Vattnet som tillförs väggen antas inte påverka temperaturfördelningen på annat sätt än att värmeledningstalet och värmekapaciteten ändras.

Temperatur- och fukttillståndet beräknas i varje tidssteg med differensmetod. Fuktflödet beskrivs med ekvationen

$$g = - \delta \cdot \frac{dv}{dx} - k \cdot \frac{dw}{dx}$$

Därefter kontrolleras för varje skikt av konstruktionen om det finns förutsättningar för frostskada. Frostskada definieras som att temperatur och fukthalt samtidigt skall anta vissa värden. Gränsen för temperaturen sätts vanligtvis till 0 °C. Kritiska fukthalten för frostsador, w_{KR} , sätts ganska lågt, så att man med säkerhet skall få några frostsador. Mot den använda beräkningsmodellen kan man invända att fukttransporten, och även temperaturförhållandena, beskrivs alltför summariskt. Inverkan av t ex vandrande isfronter på fuktfördelningen i konstruktionen, värmertilförsel och -bortförsl vid isbildning, smältning och avdunstning samt olika värmeledningstal hos vatten och is har inte beaktats. Målet för den gjorda utredningen har emellertid inte varit att utveckla en metod för dimensionering med hänsyn till frostsador utan att uppskatta den inverkan på temperatur- och fuktförhållandena som en tilläggsisolering har.

6.4.2 Beräkningar med och utan invändig tilläggsisolering

Ytterväggen antas i alla beräkningar vara en 1½-stens tegelvägg. Materialegenskaper antas som i KAP 4.4.3 om inget annat anges.

Som kriterium för att en frostskada inträffar har valts att temperaturen i väggen skall vara mindre än eller lika med 0°C samtidigt som fukthalten är större än eller lika med 140 kg/m^3 . Detta är ett strängt kriterium.

Den slagregnsmängd som träffar väggen har varierats. Beräkningen har gjorts över sex månader och slagregnet är fördelat på samma sätt varje månad.

Utetemperaturens förlopp är en approximation, sammansatt av sinusfunktioner, för normalåret 1931 - 60 i Lund. Detta har valts enligt Sandberg (1973). Uttrycket innehåller många 0-punktspassager vilket är intressant, eftersom situationer med frysning efter slagregn då kan inträffa. Inverkan av strålning har inte tagits med i beräkningarna.

Årsvariationen hos uteluftens ånghalt har också valts enligt Sandberg, för Lund.

Beräkningar har gjorts för vägg utan tilläggsisolering samt med 5, 10 och 15 cm invändig isolering ($\lambda = 0,04\text{ W/mK}$). Inget fuktutbyte med inneluften antas förekomma i något av fallen. Isoleringens inverkan har approximerats med ett värmemotstånd.

Vid beräkningens början, 1:e oktober, har fukthalten överallt i väggen satts till 30 kg/m^3 .

Då slagregnet är lika med 30 mm/månad fås inga frostsador, enligt den valda definitionen, i något av fallen.

Beräkningar med 45 och 55 mm/månad ger frostsador i de tre fallen med invändig tilläggsisolering men inte i det oisolerade fallet. Detta måste betraktas som extremt stora slagregnsmängder.

I FIG 6.14 visas, för fallen med invändig tilläggsisolering, vid vilka tillfällen frostsador inträffar då slagregnsmängden är 55 mm/månad. En stapel anger att frostskada inträffar någon gång under aktuellt dygn. Eftersom konstruktionen är indelad i skikt representerar staplarna hela skikt och frostsadornas utbredning sker språngvis. Ytskikten är hälften så breda som övriga skikt och representeras av en punkt på själva ytan. Inne i konstruktionen ligger beräkningspunkterna mitt i skikten.

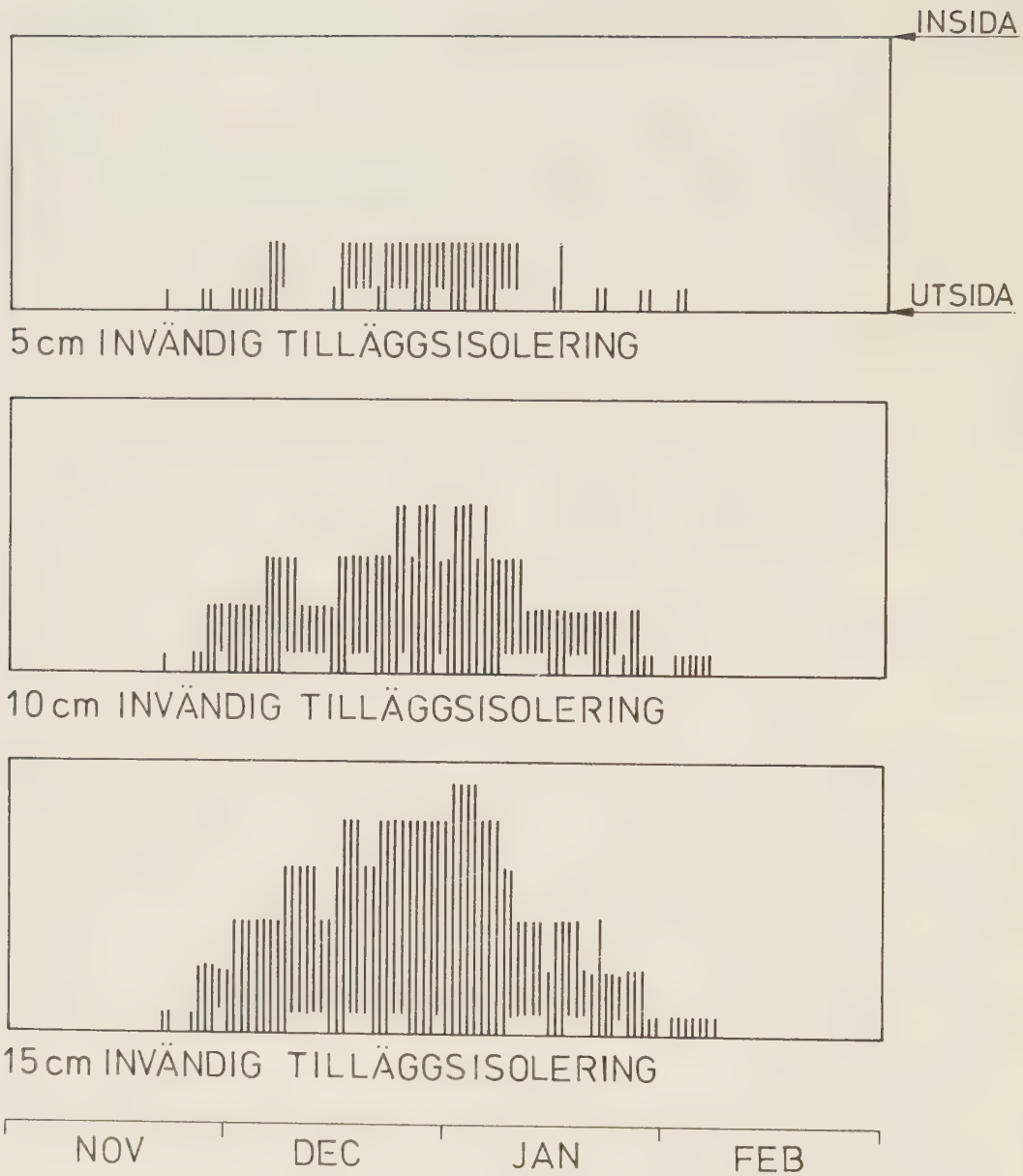


FIG 6.14. Tillfällena med frostsador i invändigt tilläggsisolerad tegelvägg vid simulerat klimat. Slagregnsmängd 55 mm/månad.

I TAB 6.4 har gjorts en sammanställning av hur lång tid under hela beräkningstiden frostsador förekommer i olika delar av väggen. Konstruktionen är indelad i sju skikt, numrerade från utsidan.

TABELL 6.4. Icke stationär beräkning av risk för frostskador i 1½-stens tegelvägg. Frostskada definieras av $\vartheta \leq 0^{\circ}\text{C}$ då $w \geq 140 \text{ kg/m}^3$.

Fall	45 mm slagregn/månad tid med skaderisk (h)	55 mm slagregn/månad tid med skaderisk (h)
Utan isolering		
Skikt 1 - 7	0	0
5 cm isolering		
Skikt 1	43	192
" 2	75	165
" 3 - 7	0	0
10 cm isolering		
Skikt 1	99	333
" 2	352	511
" 3	147	225
" 4	0	28
" 5 - 7	0	0
15 cm isolering		
Skikt 1	126	459
" 2	561	691
" 3	407	499
" 4	163	248
" 5	3	133
" 6	0	18
" 7	0	0

Den viktigaste anledningen till att inga frostskador förekommer i det oisolerade fallet är att värmeledningstalet enligt det använda uttrycket för tegel är så stort vid de höga fukthalter som det är fråga om. Detta medför att temperaturgradienten i väggen blir liten relativt sett och att väggens yttre delar får ganska hög temperatur. Väggen fryser inte under hela beräkningstiden. En beräkning med konstant λ -värde, 0,6 W/mK, och 55 mm slagregn per månad gav enstaka förekommande frostskador i ytskiktet.

Om avdunstningens temperatursänkande inverkan beaktats hade möjligen beräkningsmässiga frostskador uppstått även i de oisolerade fallen i TAB 6.4.

6.5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

För att en frostskada skall inträffa någonstans på en fasad måste tre förutsättningar samtidigt vara uppfyllda. Fasadmaterialet måste ha låg kritisk vattenmättnadsgrad, mycket fukt måste tillföras och frysning måste inträffa. Spridningen i kritisk vattenmättnadsgrad inom ett parti tegelstenar och mellan olika partier kan vara mycket stor. Slagregnets spridning över en fasad är också i allmänhet stor och till sin karaktär slumpmässig.

Sannolikheten för frostskador skulle, något förenklat, kunna ses som sammansatt av sannolikheterna för tre oberoende händelser, dålig frostbeständighet någonstans på fasaden, mycket hög fukthalt i just denna del av fasaden samt frysning. Den invändiga tilläggsisoleringen kan påverka två av dessa händelser, nämligen fukttinnehållet och frysrisk. Inverkan på fukttinnehållet måste betraktas som liten jämfört med klimatvariationernas inverkan. Frysrisk ökar för inre delen av t ex en yttervägg, men ytskiktet kan i många situationer vara fruset vare sig väggen är tilläggsisolerad eller inte.

De beräkningar som redovisades i KAP 6.4 gjordes med ett ganska strängt kriterium för frostskador. Trots detta måste extremt stora slagregns-mängder användas för att frostskador beräkningsmässigt skall uppstå. Detta beror naturligtvis delvis på att slagregnet fördelas över en stor volym.

Av FIG 6.14 och TAB 6.4 framgår att ökad invändig isolering ökar den tid under vilken det kan finnas risk för frostskador. En annan konsekvens är att frysrisk finns längre in i konstruktionen ju mera välisolerad den är. Då isbildning har skett kan kapillärsugning från det inre av konstruktionen fram till ytan inte förekomma. Uttorkningen måste ske enbart som diffusion vilket tar mycket lång tid. Under vissa tidsperioder hinner ytskiktet torka ut så att fukthalten sjunker under en kritisk nivå för frostskador. Längre in i väggen är fukthalten mycket hög under lång tid.

Den bild av frostskadornas utbredning som FIG 6.14 ger visar på en uppenbar situation där invändig tilläggsisolering kan ge ökad risk för frostskador. Om vattnet är fruset i en stor del av väggen och yttemperaturen

varierar kring fryspunkten kan isen smälta nära ytan. Om yttemperaturen sedan åter sjunker och is börjar bildas från ytan blir vatten instängt mellan två isfronter. Vattenmättnadsgraden kan då lokalt bli hög och kanske nå upp till en nivå som är kritisk för frostsador. Principen för detta resonemang illustreras i FIG 6.15.

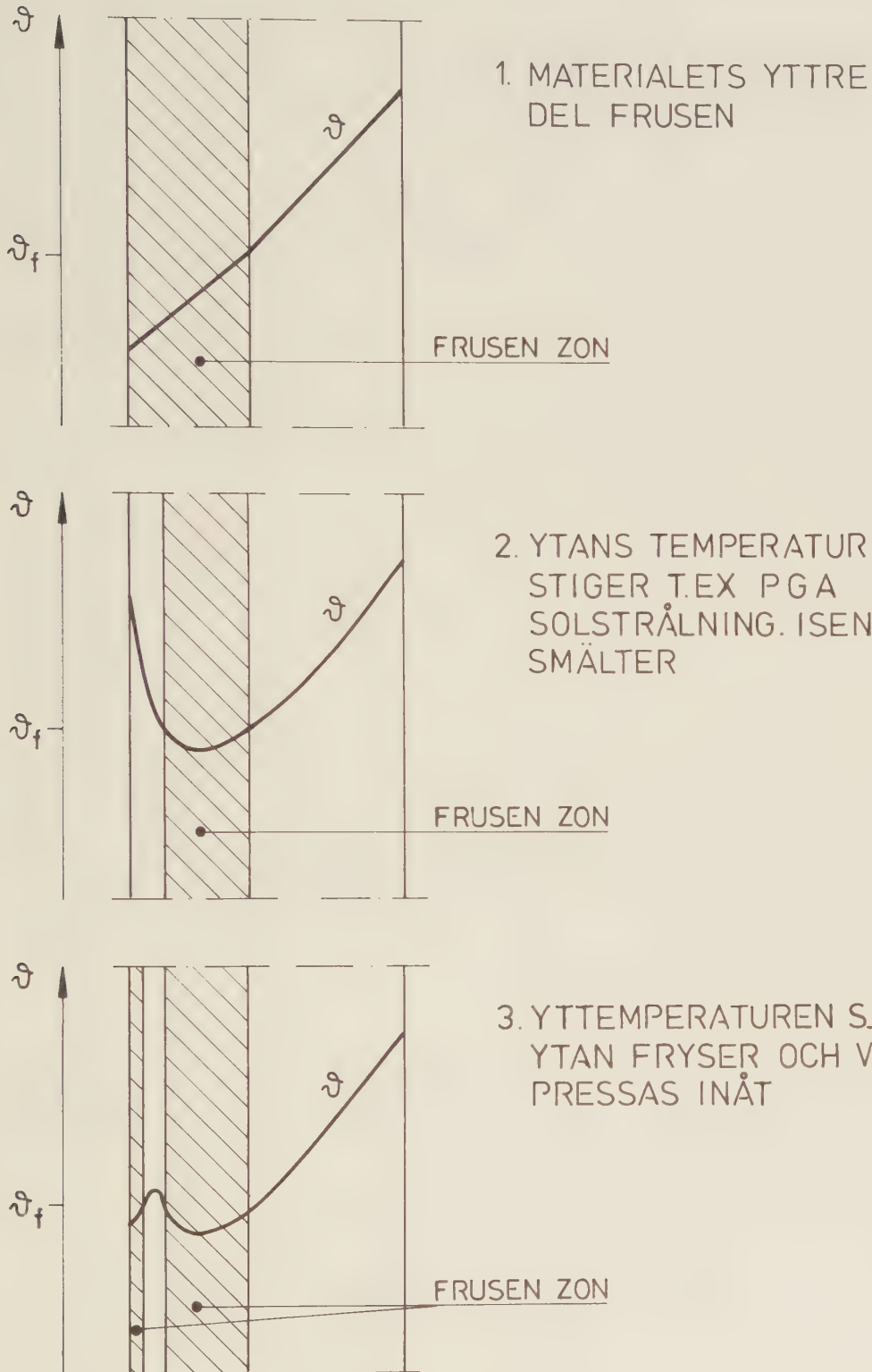


FIG 6.15. Temperaturförhållanden i vägg då vatten kan stängas in mellan två isskikt.

Ökad risk för skador fås givetvis om slagregn träffar väggen under det att ytskiktet är ofruset men väggens inre delar är frusna. Slagregnet, den del som inte rinner på ytan, kan då endast fördelas över det ofrusna skiktet så att den aktuella vattenmättnadsgraden blir hög här och skador kan uppstå om temperaturen strax efteråt sjunker.

Det finns alltså tänkbara mekanismer som kan innebära ökad risk för frostska-
skador vid invändig tilläggsisolering av en yttervägg. Å andra sidan anty-
der de beräkningar som gjorts att mycket stränga klimatförhållanden måste
råda för att man skall få frostska-
skador, vare sig med eller utan tilläggsiso-
lering, i den typ av konstruktioner som diskuterats.

I många konstruktioner inverkar säkert också det faktum gynnsamt att fukt-
transporten, speciellt kapillärsugningen, sker flerdimensionellt. Slag-
regnet fördelas ofta mycket ojämnt över byggnadens anslutningsytor och
transport i vätskefas och ångfas kan ske mellan olika delar av en fasad.

Att förutsäga om frostska-
skador kan inträffa i en vägg, vars materialegen-
skaper är dåligt kända och där de slagregns-
mängder som träffar väggen är
mycket osäkra, kan man inte göra vare sig väggen är tilläggsisolerad eller
inte. Författarens åsikt är, att om en fasad inte är speciellt utsatt för
slagregn och frostska-
skador inte tidigare förekommit bör man inte avhålla
sig från att tilläggsisolera enbart med tanke på risken för frostska-
skador. Om frostska-
skador förekommit tidigare är det möjligt att tilläggsisoleringen
kan öka omfattningen av sådana. Vid mycket ogynnsamma klimatförutsättningar,
vintrar med många fryspunktpassager och kraftiga slagregn kan det finnas
en liten risk att frostska-
skador uppkommer efter en tilläggsisolering även
om materialet tidigare varit beständigt.

Verkligt svåra klimatsituationer, frysning strax efter kraftigt slagregn,
ger säkert ibland upphov till frostska-
skador. I detta fall har värmetranspor-
ten inifrån troligen mycket liten betydelse.

7 TEMPERATURSPÄNNINGAR OCH -RÖRELSER

7.1 ALLMÄNT

Byggnadskonstruktioner som är utsatta för variationer hos omgivande klimat påverkas av detta genom att ingående material vill deformeras. Temperaturhöjning liksom ökad fukthalt i ett byggnadsmaterial ger volymökning, sänkt temperatur eller fukthalt ger minskad volym.

Byggnadskonstruktioner förhindras av olika anledningar att röra sig fritt. De måste samverka med andra konstruktioner som har andra deformationsegenskaper eller som inte utsätts för samma klimatpåverkan. Förhindrad rörelse medför spänningar.

TAB 7.1 är ett försök till sammanställning av de olika faktorer som inverkar på spännings- och deformationstillståndet i en byggnadsdel. Endast de faktorer som har samband med klimatvariationer har tagits med. Spänningar och deformationer av andra belastningar, samt kemiska förändringar i materialen har inte tagits med.

TABELL 7.1. Faktorer som inverkar på spänningar och deformationer orsakade av klimatvariationer.

Faktor	Inverkan
- Konstruktionens uppbyggnad, ingående material	Hållfasthets- och deformationsegenskaper. Värmeledningsförmåga och -kapacitet, sorptionskurva, absorption för strålning.
- Inspänningsförhållanden, fogar samt öppningar.	Rörelsemöjlighet. Resultterande spänningar. Spänningskoncentrationer.
- Placering av värmeisolerande skikt	Fukt- och temperaturlstånd.

Variabel	Inverkan
- Klimat	
utetemperatur	
direkt och diffus strålning	
uteånghalt	Belastning på konstruktionen
nederbörd	
innetemperatur	
inneånghalt	
- Årstid	Dygnsvariationer och årsvariationer
- Referenstillstånd	Storlek av tryck- eller dragspänningar
- Andra belastningar	Summatillstånd, huvudspänningar

I detta avsnitt skall diskuteras vilken inverkan en invändig tilläggsisolering har på temperaturspänningar och -rörelser i en befintlig byggnadsdel. I KAP 8 skall fuktvariationernas inverkan behandlas.

Problemet med spänningar på grund av varierande temperatur-och fuktförhållanden är egentligen mycket komplicerat och kräver för hög noggrannhet ickelinjär analys. I denna rapport har använts ett mycket approximativt förfarande. Detta kan motiveras med att det är relationen mellan två tillstånd som studeras. För ändamålet har linjära tillstånd förutsatts med elastiska, homogena och isotropa material. Detta medför att man kan behandla problemet genom att beräkna spänningar och deformationer vid ett referenstillstånd, beräkna tilläggsisoleringens inverkan på fukt- och temperaturtillståndet och därefter gå tillbaka och beräkna de härav ändrade spänningarna och deformationerna.

7.2 GRUNDLÄGGANDE SPÄNNINGS- OCH DEFORMATIONSSAMBAND

Temperaturspänningar kan uppträda i en kropp som har annan temperatur än sin referenstemperatur om a) kroppen är utsatt för yttre påverkan som förhindrar den att fritt deformeras eller b) ojämn uppvärmning (exempelvis) medför att olika delar av kroppen vill deformeras på olika sätt, men tvingas att samverka.

Allmänna kriterier för att ett temperaturfält inte skall medföra spänningar är att det är linjärt och att kroppen har rörelsemöjlighet.

Problemet att beräkna temperaturspänningar i en kropp kan delas upp i två delproblem.

1. Att för en viss tidpunkt beräkna kroppens temperaturfält
2. Att beräkna spänningar och deformationer på grund av detta temperaturfält

Del 1 kan behandlas med analytiska eller numeriska metoder och skall inte särskilt diskuteras här.

För en kropp enligt FIG 7.1 som utsätts för ett treaxiellt spänningstillstånd gäller nedan angivna ekvationer.

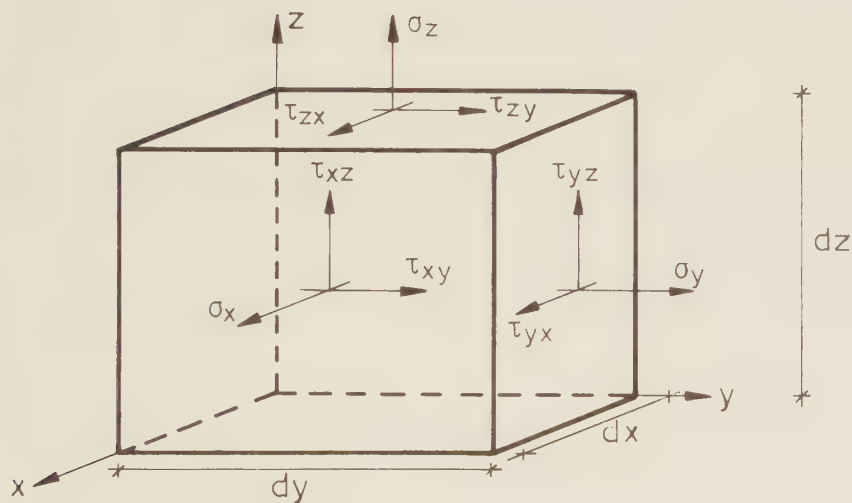


FIG 7.1. Treaxiellt spänningstillstånd.

$$\epsilon_x = 1/E (\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z))$$

$$\epsilon_y = 1/E (\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x))$$

$$\epsilon_z = 1/E (\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y))$$

där ϵ_x , ϵ_y och ϵ_z är töjningarna i x, y och z-riktningarna, E är elasticitetsmodulen och ν Poisson's tal.

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy}/G$$

$$\gamma_{yz} = \tau_{yz}/G$$

$$\gamma_{zx} = \tau_{zx}/G$$

där γ är vinkeländringen på grund av skjuvspänningen τ och G är skjuvmodulen.

Om temperaturen i kroppen höjs ϑ grader och materialets temperaturutvidgningskoefficient är α fås töjningen

$$\epsilon_t = \alpha \cdot \vartheta$$

De spänningsberoende och de temperaturberoende töjningarna i samma riktning kan adderas. Därmed erhålls

$$\epsilon_x = 1/E (\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) + \alpha \cdot \vartheta$$

$$\epsilon_y = 1/E (\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)) + \alpha \cdot \vartheta$$

$$\epsilon_z = 1/E (\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)) + \alpha \cdot \vartheta$$

Skjuvspänningarna blir oförändrade eftersom fri termisk utvidgning i ett isotropt material inte medför några vinkeländringar.

I det följande tillämpas teorin på några elementära fall där spänningarna lätt kan beräknas. Dessa elementära fall kan ofta användas som modeller vid överslagsberäkningar.

a) Balk , fast inspänd i båda ändar, som utsätts för temperaturhöjning.

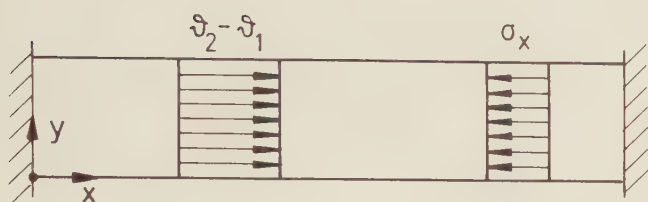


FIG 7.2. Temperaturspänningar i fast inspänd balk vid homogen temperaturhöjning.

En balk vars temperatur överallt höjs från referenstemperaturen ϑ_1 till ϑ_2 och som i bägge ändar är förhindrad att röra sig utsätts för en tryckspänning

$$\sigma_x = -\alpha E (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

En godtycklig temperaturfördelning $\vartheta_2(y)$ medför spänningen i balken

$$\sigma_x(y) = -E(\vartheta_2(y) - \vartheta_1) .$$

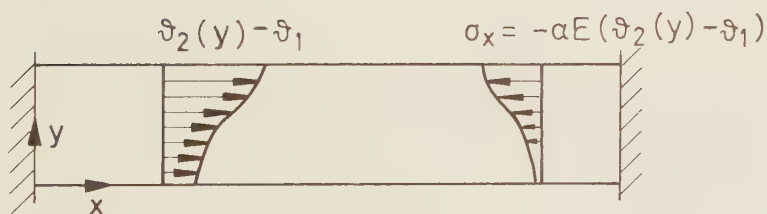


FIG 7.3. Temperaturspänningar i fast inspänd balk vid godtycklig temperaturfördelning över balkens höjd.

b) En plan platta av godtycklig form värms till temperaturen ϑ_2 över referenstemperaturen ϑ_1 . Utvidgning är förhindrad vid ränderna ($\epsilon_x = \epsilon_z = 0$)

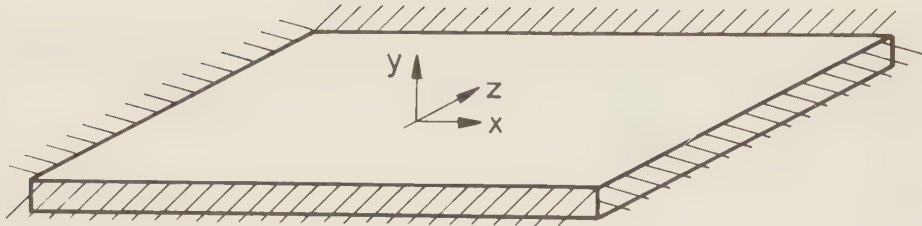


FIG 7.4. Platta fast inspänd vid ränderna.

Spänningarna blir

$$\sigma_x = \sigma_z = -\alpha \frac{E}{1-\nu} (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

$$\sigma_y = 0$$

En godtycklig temperaturfördelning i y -riktningen ger de spänningar som visas i FIG 7.5.

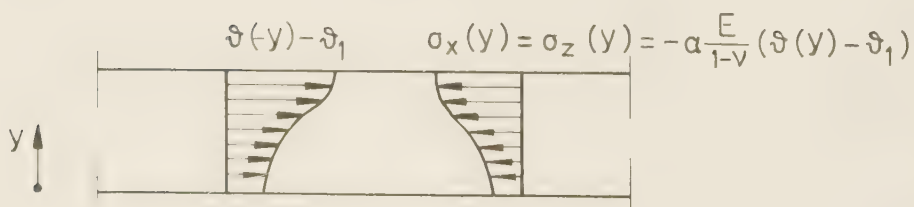


FIG 7.5. Spänningar i platta med fast inspända ränder vid temperaturvariation över höjden.

c) En kropp av godtycklig form värms från ϑ_1 till ϑ_2 . Vid begränsning ytorna finns yttre hinder ($\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = 0$).

Detta ger

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -\alpha \frac{E}{1 - 2\nu} (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

d) En balk vars ändar är fritt upplagda utsätts för spänningar om den påverkas av olinjär temperaturgradient.

Spänningar kan i detta fall beräknas genom överlagring av två enkla fall.

1) Balken antas fast inspänd ($\epsilon_x = 0$). Spänningen beräknas då enligt a).

2) Balken frigörs genom att krafter och moment införs, vilka upphäver de krafter och moment som åstadkoms av fall 1.

I fall 2 införs ett s k ekvivalent lastsystem vars inverkan kan bestämmas enligt hållfasthetslärans regler.

Betrakta systemet i FIG 7.6. Balken som är fritt upplagd utsätts för temperaturhöjning $\vartheta(x, y)$.

Om balken var fast inspänd skulle spänningen $\sigma = -\alpha \cdot E \cdot \vartheta(x, y)$ uppträda. Jämviktsvillkoren medför att resultanterna till denna spänningsfördelning blir normalkraften

$$N_x = \int_A \sigma \, dA = \int_A -E \alpha \vartheta \, dA$$

samt momentet

$$M_x = \int_A \sigma \cdot y \, dA = \int_A -E \cdot \alpha \cdot \vartheta \cdot y \, dA$$

Eftersom normalkraften varierar med x finns det också en motsvarande axiell last som definieras av

$$n = \frac{dN}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\int_A -E \cdot \alpha \cdot \vartheta \, dA \right)$$

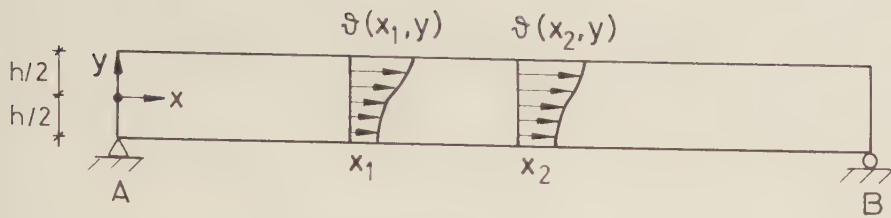
Motsvarande vertikala last, q , är

$$q = - \frac{d^2 M}{dx^2} = - \frac{d^2}{dx^2} \left(\int_A -E \cdot \alpha \cdot \vartheta \cdot y \, dA \right)$$

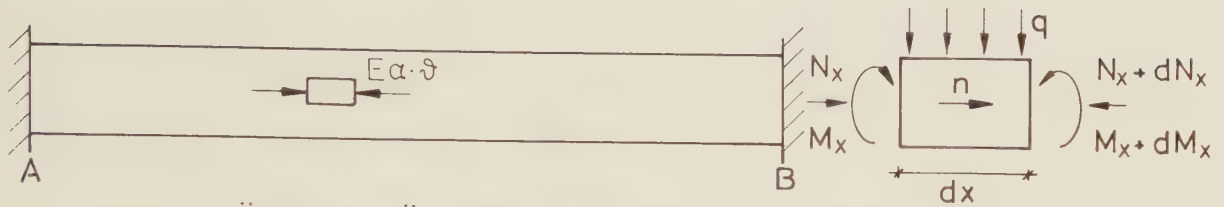
För att frigöra balken belastas denna med ovan angivna lastsystem i motsatt riktning (FIG 7.6.d).

Spänningarna i balken blir då summan av spänningarna på grund av det frigörande systemet och $-E \cdot \alpha \cdot \vartheta(x, y)$. Summan av dessa två spänningstillstånd ger i varje snitt linjär töjning.

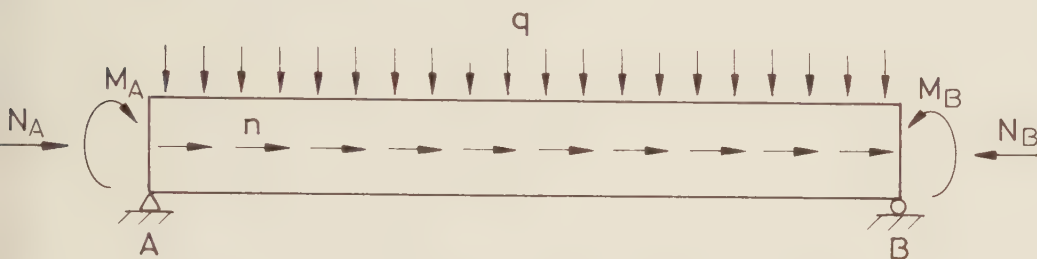
Spänningarna nära balkens ränder kan inte beräknas med denna teori. Samma typ av lokala fel uppträder vid all förenklad spänningsanalys av balkar och plattor i närheten av inspänningsområdet.



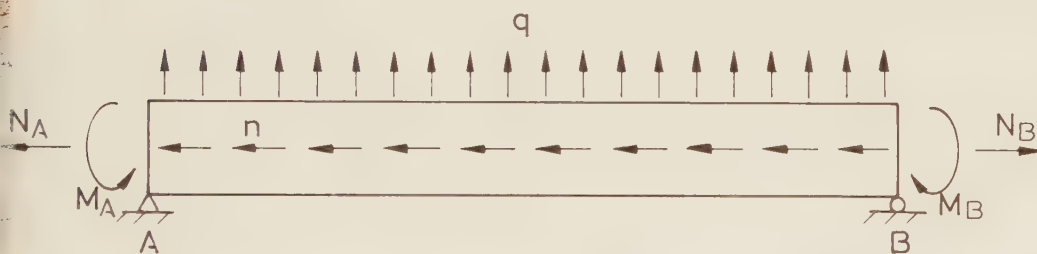
a) VERKLIGT SYSTEM



b) BALKENS RÄNDER FÖRHINDRADE ATT FRITT RÖRA SIG



c) KRAFTSYSTEM SOM GER SAMMA SPÄNNINGAR SOM b)



d) MOTSATT KRAFTSYSTEM SOM I c) UPPHÄVER FASTHÅLLNINGEN.

ÖVERLAGRING AV b) OCH d) GER TOTALA TEMPERATURSPÄNNINGEN I BALKEN.

FIG 7.6. Temperaturspänningar i fritt upplagd balk. Delvis efter Zienkiewicz (1961).

Om balken endast utsätts för temperaturvariation $\vartheta(y)$ över höjden kommer det yttre kraftsystemet att bestå enbart av moment och normalkraft i bägge ändar. Temperaturspänningen blir då

$$\sigma_x = -\alpha E \vartheta + \frac{N}{A} + \frac{M \cdot y}{I}$$

där y är avståndet från böjningsaxeln och I tvärsnittets yttröghetsmoment.

Töjningen ϵ_x beräknas ur

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} + \alpha \cdot \vartheta$$

Balkens utböjning i mittsnitt, enligt FIG 7.7, fås som

$$w = \rho - \sqrt{\rho^2 - x^2}$$

Detta kan approximeras till

$$w = -\frac{x^2}{2\rho}$$

Likformiga trianglar ger

$$\rho = x \cdot \frac{h}{\Delta x}$$

$$\Delta x = (\epsilon_{y=h/2} - \epsilon_{y=-h/2}) \cdot x$$

Således blir

$$w = -\frac{x^2}{2h} (\epsilon_{y=h/2} - \epsilon_{y=-h/2})$$

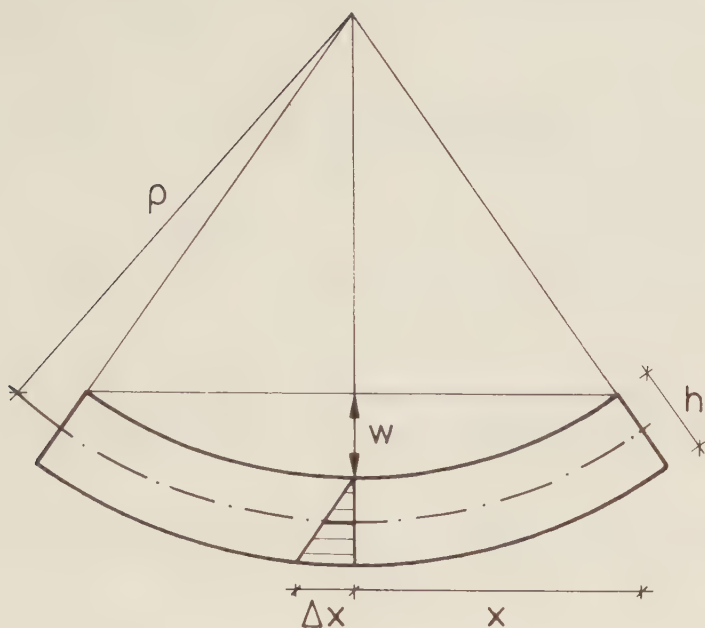


FIG 7.7. Utböjning av balk med temperaturvariation över höjden.

Om temperaturfördelningen är symmetrisk, $\vartheta(y) = \vartheta(-y)$ blir momentet lika med noll.

e) I ett fall med en rektangulär platta, vars ränder är fria, kan ett analogt resonemang genomföras.

Koordinatsystemet väljs enligt FIG 7.4.

En temperaturhöjning $\vartheta(z)$ skulle, om plattan var inspänd längs ränderna, medföra normalspänningarna

$$\sigma_x = \sigma_z = - \frac{E \alpha \vartheta}{1 - \nu}$$

För att frigöra ränderna införs följande system av krafter, motsatt riktade resultanterna till den ovan angivna spänningsfördelningen

$$N_x = N_z = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E \cdot \alpha \cdot \vartheta}{1 - \nu} dy$$

$$M_x = M_z = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E \cdot \alpha \cdot \vartheta}{1 - \nu} \cdot y dy$$

där h är plattans tjocklek och y är positiv uppåt.

Om temperaturfördelningen också är funktion av plankoordinaterna måste även axiell och utbredd last införas, enligt d).

Sammanlagt fås följande spänningar och deformationer

$$\sigma_x = \sigma_z = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \cdot \left(-\vartheta + \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \vartheta dy}{h} + \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \vartheta \cdot y dy}{h^3} \cdot 12 y \right)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z = \alpha \left(\frac{\int_{-h/2}^{h/2} \vartheta dy}{h} + \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \vartheta \cdot y dy}{h^3} \cdot 12 y \right)$$

$$w = -\frac{6}{h^3} (x^2 + z^2) \cdot \int_{-h/2}^{h/2} \vartheta \cdot y dy$$

f) Delvis förhindrade temperaturrörelser

En balk är fast inspänd i ena änden och har ett fjädrande stöd som rör sig sträckan s per kraftenhet som påverkar stödet.

Spänningarna på grund av en temperaturhöjning ϑ_1 kan beräknas som summan av spänningarna i de två fallen i FIG 7.8.

I fall I förhindras rörelsen helt och reaktionskraften blir

$$P = \alpha \cdot \vartheta_1 \cdot A \cdot E.$$

I fall II läggs denna kraft på i motsatt riktning, varvid stödets förskjutning blir lika med u .

Skillnaden mellan fri och erhållen rörelse är $x = \alpha \vartheta_1 L - u$

Detta svarar mot en kraft

$$P' = \alpha \vartheta_1 AE - \frac{uAE}{L}$$

P' är också lika med u/s .

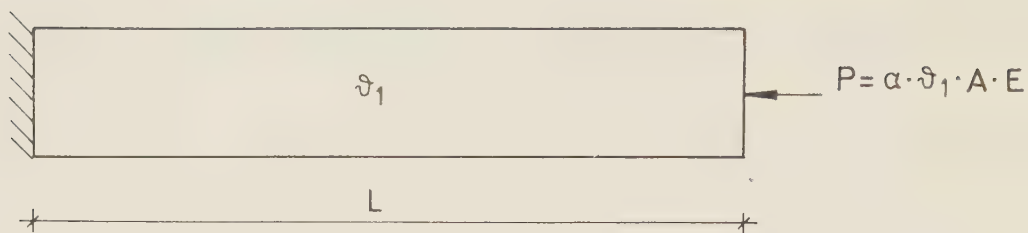
Insättning och användning av $\sigma = E \cdot \frac{u}{L}$ ger

$$\sigma_{II} = \frac{\alpha \cdot \vartheta_1 \cdot E}{1/AE\varepsilon_0 + 1}$$

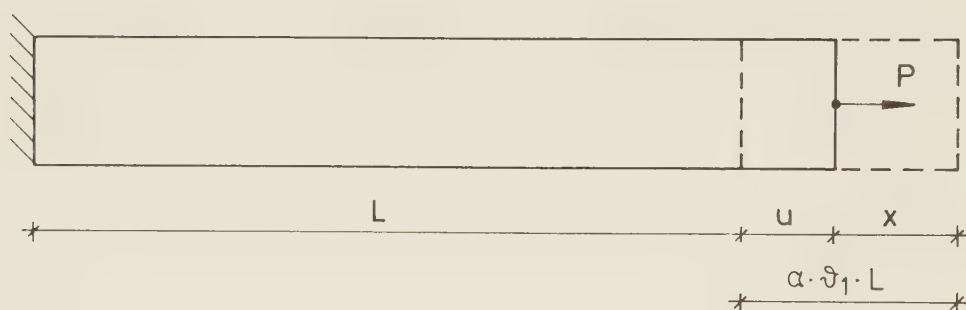
där $\varepsilon_0 = s/L$

Totala spänningen i balken blir

$$\sigma_I + \sigma_{II} = - \frac{\alpha \cdot \vartheta_1}{\varepsilon_0 \cdot A + 1/E}$$



$$\sigma_I = -\alpha \vartheta_1 \cdot E$$



$$\sigma_{II} = \frac{\alpha \vartheta_1 E}{1/AE\varepsilon_0 + 1}$$

FIG 7.8. Balk med delvis eftergivligt stöd.

I FIG 7.9 visas ett exempel på inverkan av varierande eftergivlighet hos stödet. Den betraktade balken är av tegel med höjden 38 cm ($E = 2000$ MPa). Balken utsätts för temperatursänkningen 20°C överallt.

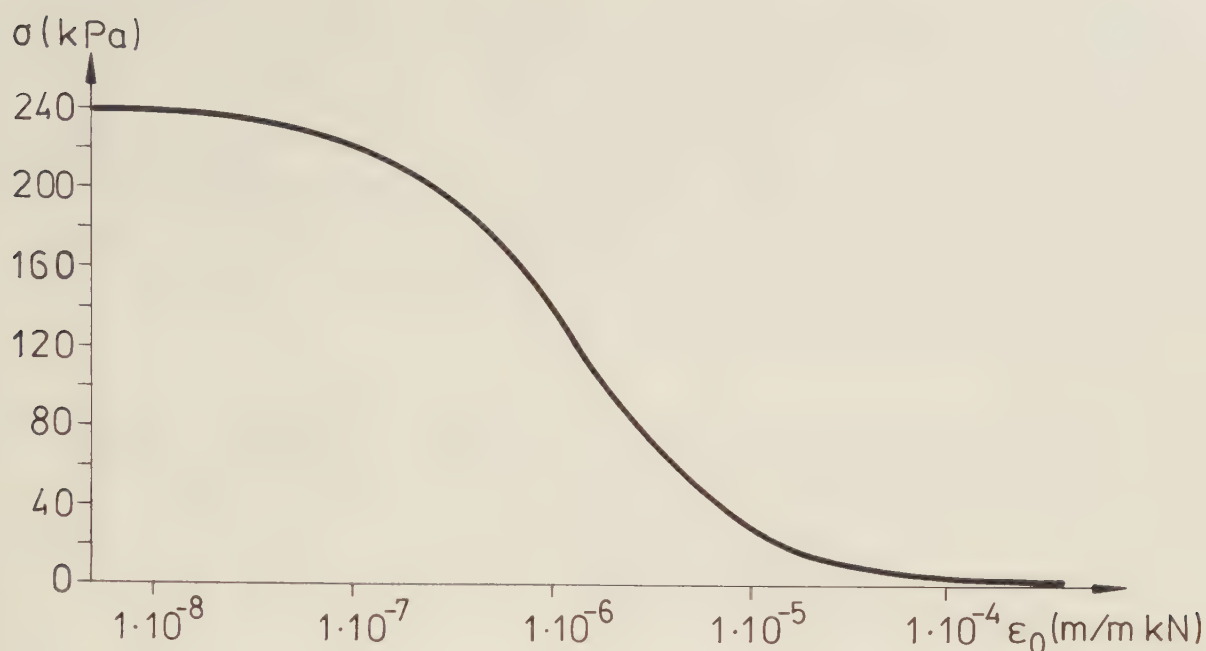


FIG 7.9. Temperaturspänning i tegelbalk på två stöd där det ena har varierande eftergivlighet. Temperatursänkning 20 °C.

7.3 TEMPERATURSPÄNNINGAR OCH -RÖRELSER I HOMOGENA YTTERVÄGGAR

7.3.1 Beräkningsmodeller och -förutsättningar

I detta avsnitt behandlas endast homogena ytterväggar. Beräkningar av temperaturspänningar i dessa har gjorts med två modeller

1 Platta med oförskjutbara ränder i x- och z-riktningarna. Temperaturvariation endast i tjockleksriktningen (y-riktningen)

2 Platta med fria ränder. Temperaturvariation endast i tjockleksriktningen.

De två valda modellerna ger ytterlighetsfallen i fråga om väggens anslutningar till andra byggnadsdelar. I det första fallet uppträder spänningar vid varje ändring från referenstemperaturen. I det andra fallet fås spänningar endast då temperaturgradienten är olinjär. I praktiken förekommer dessa inspänningsförhållanden inte renodlat i en byggnadsstomme. Fast inspänning skulle förutsätta att anslutande innerväggar och bjälklag var oändligt styva. Fria ränder motsvarar snarast ett fall då sprickor har slagit upp längs anslutningar och bjälklag.

Förutsättningen att temperaturen varierar endast i tjockleksriktningen är en approximation eftersom köldbryggor i väggarna ger flerdimensionell värmeströmning. Temperaturgradienten i väggens plan är dock oftast liten jämfört med temperaturgradienten genom väggen. I ett följande avsnitt uppskattas vilken inverkan detta kan ha.

Temperaturvariationer och därav orsakade rörelser och spänningar kan delas in i dygnsvariationer och årsvariationer. Innetemperaturen antas i fortsättningen vara konstant.

Nylund (1975) använder, för beräkningar av rörelser i fasadskivor, den s k ekvivalenta utetemperaturen, vilken delas upp i fyra delar.

$$T_e = T_{e\dot{a}} + T_{ed} = T_{l\dot{a}} + T_{ld} + T_{s\dot{a}} + T_{sd}$$

$T_{l\dot{a}}$ = lufttemperaturens årsperiodiska variation

T_{ld} = lufttemperaturens dygnsperiodiska variation

$T_{s\dot{a}}$ = strålningsandelens årsperiodiska variation

T_{sd} = strålningsandelens dygnsperiodiska variation

Med strålningsandelen menas termen $\frac{aI}{\alpha_u}$ i den ekvivalenta utetemperaturen.

I FIG 7.10 visas schematiskt den ekvivalenta utetemperaturens års- och dygnsvariation.

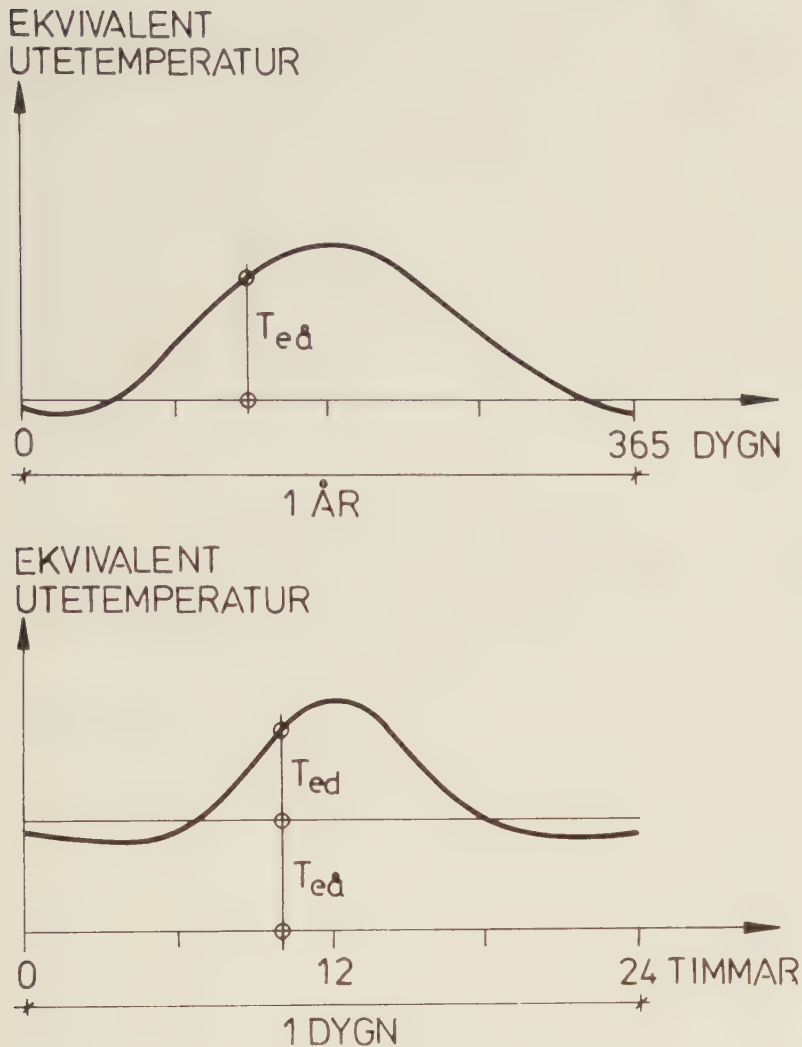


FIG 7.10. Ekvivalent utetemperatur, års- och dygnsvariation enligt Nylund (1975).

Avsikten med beräkningarna i detta avsnitt är huvudsakligen att visa vilken inverkan invändig tilläggsisolering har på temperaturspänningarnas storlek. Det har härvid inte ansetts intressant att betrakta extrema klimatsituationer, såvida erhållna resultat inte antyder att detta är nödvändigt. Därför har beräkningarna gjorts för några olika klimatsituationer, fördelade över ett år. Tidpunkterna har inte valts efter andra kriterier än att representera en årstid.

Det klimat som valts är Stockholm, oskuggad vägg som vetter mot söder. Dygns- och årsvariationer har beaktats på följande sätt. Ett par dygn har fått representera varje årstid. Dygnen har i allmänhet förutsatts helt klara, vilket ger de största dygnsvariationerna. Någon beräkning för ett molnigt dygn har också gjorts. Beräkningarna av det icke stationära temperaturfältet har gjorts med P I Sandbergs datorprogram, och de rutiner som finns där för den ekvivalenta utetemperaturen har använts. Ytans absorption för strålning har satts till 0,7. De dygn som beräkningar redovisas för är 2/1, 4/1, 4/4, 4/7 och 4/10. 2/1 har förutsatts vara ett molnigt dygn, till skillnad från de övriga. Årsvariationen har sedan uppskattats genom att dygn vid olika årstider jämförts med varandra. Detta ger endast en uppfattning om storleken av årsvariationen, och inte dess maximala värde.

Vid beräkning av temperaturfältet har konstruktionen delats in i sex skikt. Temperaturen beräknas då i sju punkter, enligt FIG 7.11. Eventuell värmeisolering har förutsatts sakna värmekapacitet och dess inverkan har approximerats med ett ekvivalent värmeövergångsmotstånd.

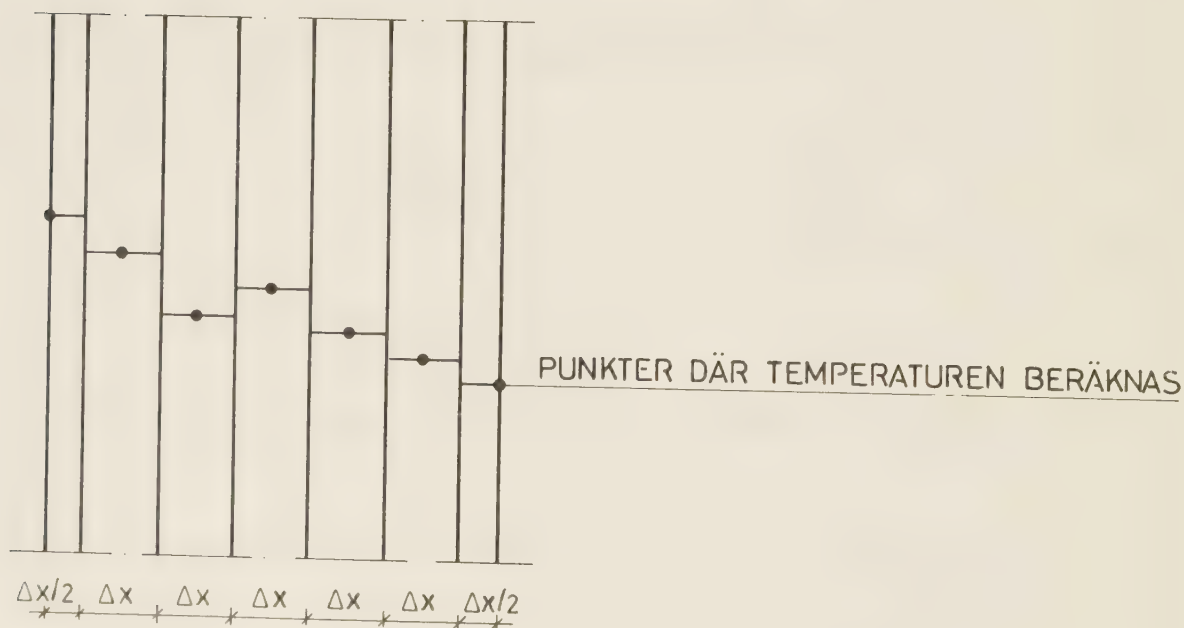


FIG 7.11. Skiktindelning vid beräkning av temperaturfältet.

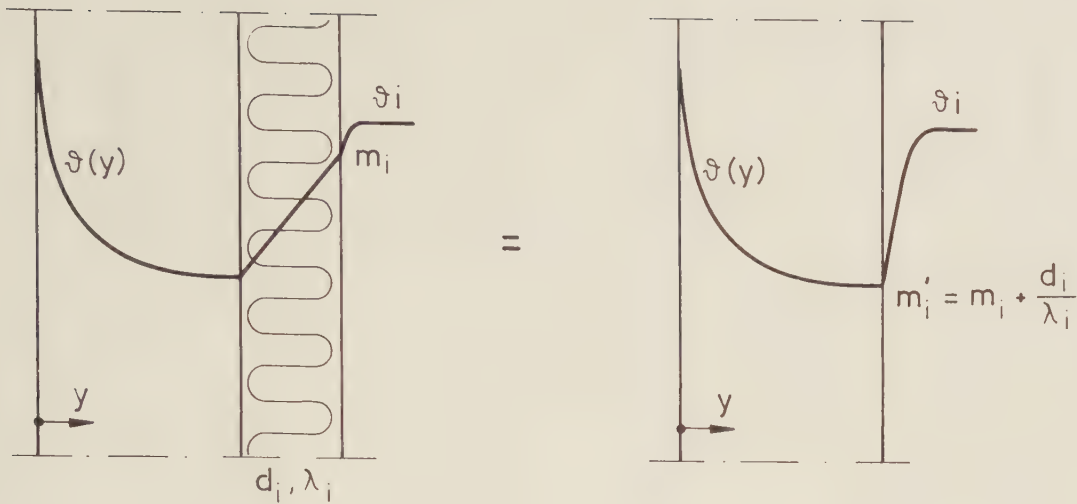


FIG 7.12. Approximation av tilläggsisolering med värmeövergångsmotstånd vid beräkning av icke stationära temperaturförlopp.

Vid antagande om fast inspänning längs ränderna har normalspänningen i väggens olika skikt beräknats enligt

$$\sigma_x(I) = \sigma_z(I) = - \frac{E \cdot \alpha}{1 - \nu} (\vartheta(I) - \vartheta_0)$$

där I betecknar skiktets nummer och ϑ_0 är referenstemperaturen.

Fria ränder förutsätter beräkning av

$$\int_{-h/2}^{h/2} (\vartheta - \vartheta_0) dy \text{ och } \int_{-h/2}^{h/2} (\vartheta - \vartheta_0) y dy$$

Här har valts att approximera temperaturfördelningen, som endast är känd i diskreta punkter, med ett interpolationspolynom. Newtons interpolationspolynom har egenskaperna att det går genom de kända punkterna, och att termer av högre grad kan läggas till för ökad noggrannhet. Sju kända punkter ger ett polynom av grad 6. Efter omformning kan polynomet direkt integreras. FIG 7.13 visar ett exempel på interpolationspolynoms utseende i förhållande till de beräknade temperaturerna.

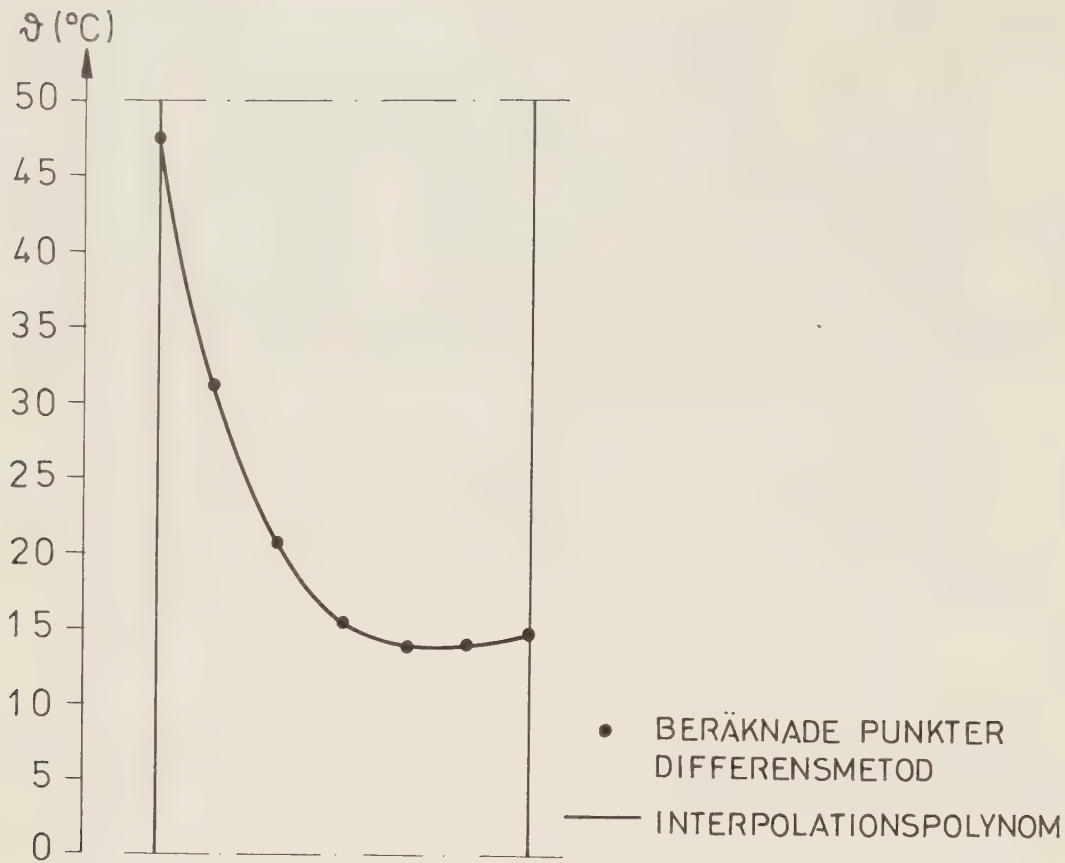


FIG 7.13. Approximation av temperaturfördelning med Newtons interpolationspolynom av grad 6.

Polynomets noggrannhet kan kontrolleras genom att man beräknar funktionsvärden för successivt växande grad på polynomet. Sådana beräkningar visar att approximationens noggrannhet är mycket god för de betraktade fallen.

Jämförelse har också gjorts mellan interpolationspolynomet av grad 6 och temperaturfördelning beräknad med tätare indelning, 10 skikt. Detta visas i FIG 7.14.

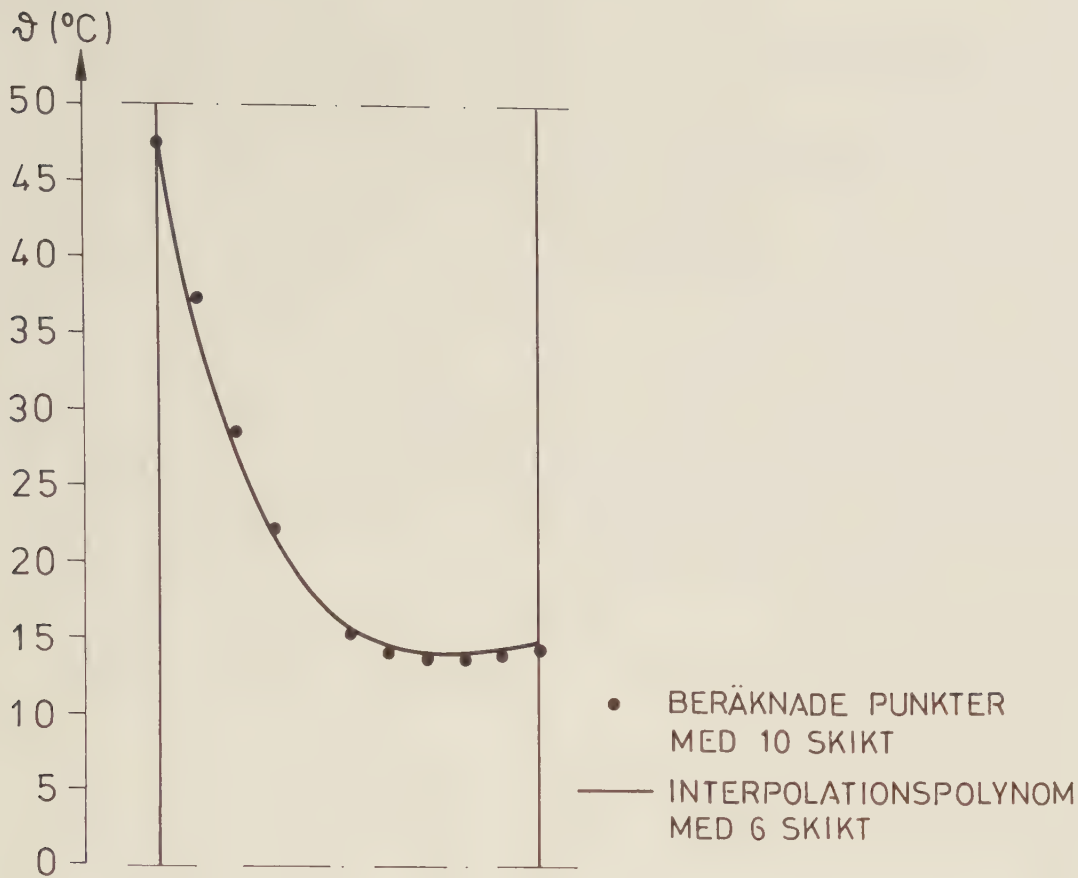


FIG 7.14. Jämförelse mellan temperaturfördelning approximerad med interpolationspolynom av grad 6, och temperaturfördelning beräknad med tätare skiktindelning.

Nylund (1975) har i sina beräkningar av temperaturrelater i fasadskivor approximerat temperaturgradienten i skivan med ett kvadratisk uttryck

$$\theta(y) = A + B y + C \cdot y^2$$

Fördelen med detta förfarande är att endast yttemperaturerna behöver vara kända, för att uttrycken för rörelser och spänningar skall kunna beräknas.

Härledningen av uttrycket förutsätter att temperatur - tidkurvorna i konstruktionens olika skikt vid en godtycklig tidpunkt är nära parallella. Detta antagande ligger för tunna skivor med god isolering invändigt nära sanningen vid de två tidpunkter på dygnet då temperaturskillnaden mellan ytskikten är störst. Nylunds undersökning är begränsad till fasadskivor

med tjockleken 12,5 cm. För tjockare skivor är noggrannheten sämre.

De konstruktioner som studeras i denna rapport är ofta mycket tjocka (≥ 25 cm) och i referensfallet ej välisolerade varför approximation med kvadratisk uttryck för temperaturfördelningen förmodligen inte kan anses tillfredsställande. Jämförelse har gjorts mellan beräkningar av $\int \vartheta(y) dy$ dels med antagande av kvadratisk temperaturfördelning och dels med interpolationspolynom anpassat till sju beräknade temperaturer i konstruktionen. FIG 7.15 visar denna jämförelse för en 250 mm gasbetongvägg invändigt isolerad med 10 cm mineralull under ett dygn i början av april, klart väder.

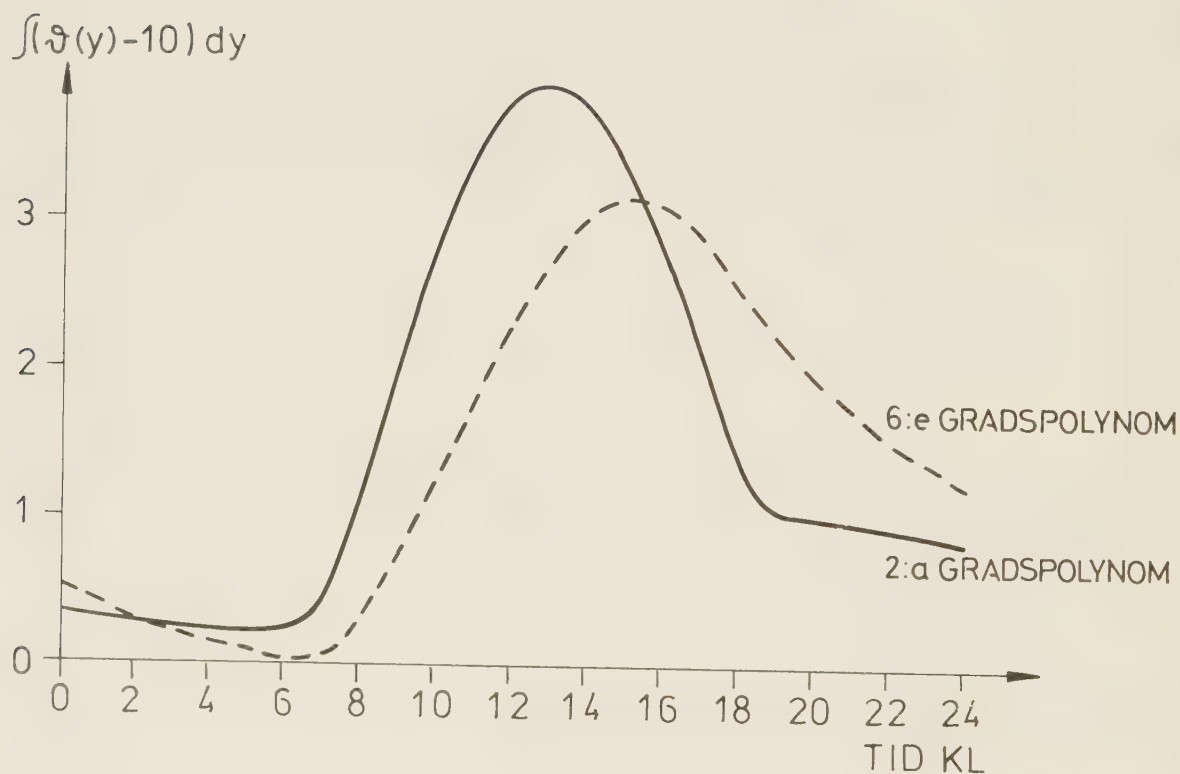


FIG 7.15. Beräkning av $\int \vartheta(y) dy$ med antagande om kvadratisk temperaturfördelning respektive interpolationspolynom av grad 6 för temperaturfördelningen, 4 april, klart väder. Referenstemperatur 10°C .

Av FIG 7.15 framgår att approximation av temperaturfördelningen med ett polynom av låg grad medför att temperaturspänningen överskattas, åtminstone i de fall då man har solstrålning på väggen. Förklaringen till detta är att yttemperaturen påverkar temperaturfördelningens utseende för mycket. I det beräknade fallet får $\int \vartheta(y) dy$ samma tidsförlopp som ytskiktets tem-

peratur. Vid kraftiga konstruktioner med stor värmekapacitet bör man därför göra en noggrannare approximation där man tar hänsyn till temperaturförloppet i konstruktionens inre.

De konstruktioner som behandlas i det följande är $1\frac{1}{2}$ -stens massiv tegelvägg och 250 mm gasbetongvägg.

7.3.2 $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg

Spänningen och längdändringen har beräknats i de sju punkter där temperaturen är bestämd. Väggens mittutböjning har också beräknats för dimensionen $5 \times 8 \text{ m}^2$. Detta är ett ganska stort fält, motsvarande två våningar i höjdlängd. Beräkningar har gjorts för en oisolerad vägg och för samma vägg invändigt isolerad med 10 cm mineralull ($\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$).

FIG 7.16 - 19 visar förhållandena för den oisolerade väggen den 2/1, 4/1, 4/4 och den 4/7. De tre diagrammen i varje figur visar temperaturförloppet i sju punkter i väggen, spänningar i väggens mittnytt samt i de två ytskikten vid fast inspända respektive fria ränder, och slutligen utböjningen av väggens mittnytt då väggen antas fri. Skikten är numrerade från utsidan. 1 betyder närmast uteluften, 4 mittnyttet och 7 närmast inneluften.

FIG 7.20 - 23 visar samma beräkningar för den invändigt isolerade ytterväggen.

Materialdata för teglet har antagits vara

Värmeledningstal, $\lambda = 0,60 \text{ W/mK}$

Värmekapacitet, $\gamma c_p = 1260 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3\text{K}$

Temperaturutvidgningskoefficient, $\alpha = 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Elasticitetsmodul, $E = 2000 \text{ MPa}$

Poisson's tal, $\nu = 0,3$

Referenstemperaturen har i alla beräkningar satts till 10°C .

Beträffande Poisson's tal varierar tillgängliga litteraturuppgifter. Searle (1960) anger 0,3 för tegel medan t ex Hast (1949) anger 0,20 - 0,25 för tungt tegel och 0,17 för poröst tegel. Här har emellertid använts 0,3 genomgående.

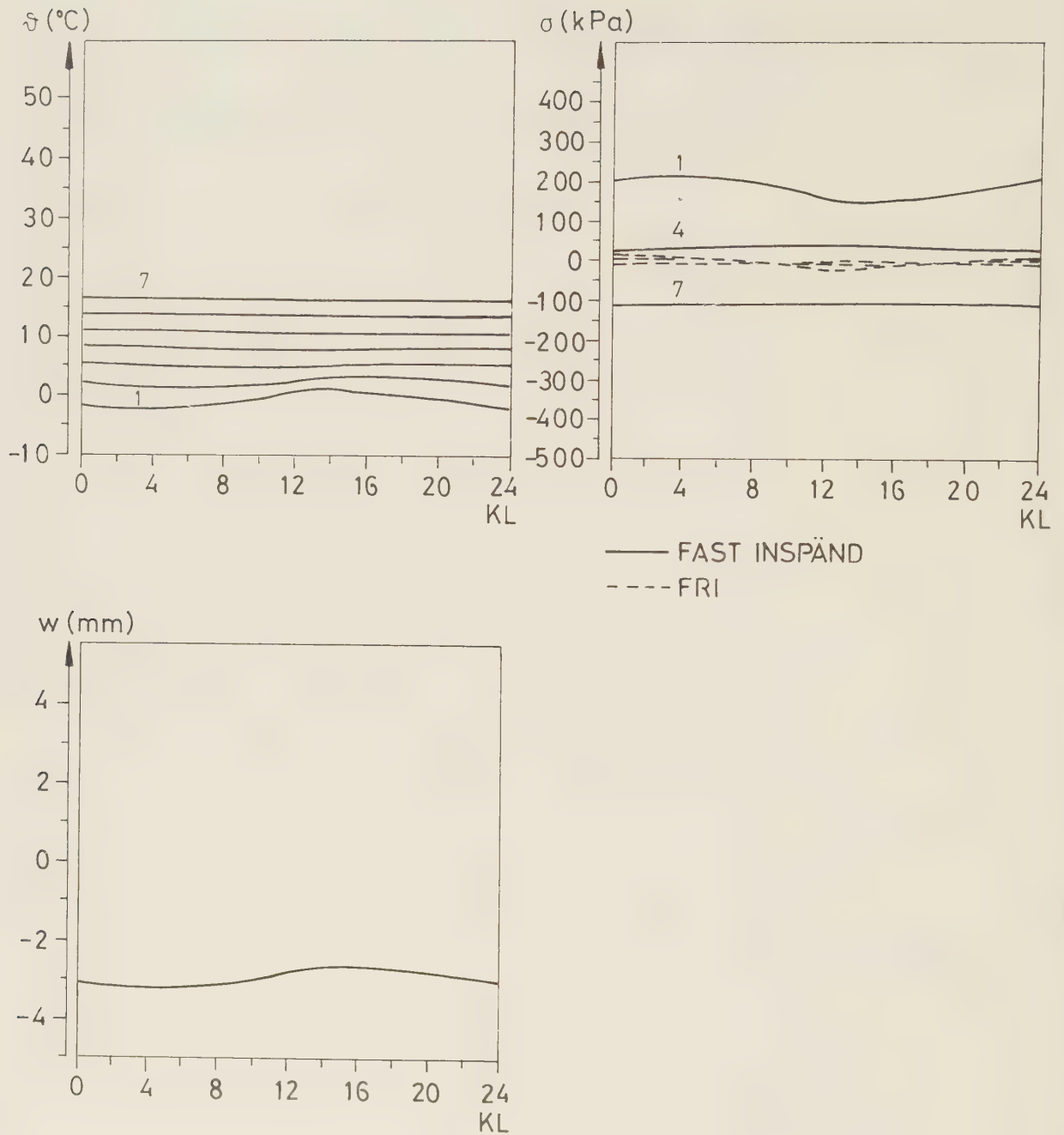


FIG 7.16. Temperaturförlopp, spänningar vid fast inspända respektive fria ränder samt utböjning i fri plattas mittnitt. 2/1 mulet väder. $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg utan tilläggsisolering. Stockholm, södervägg.

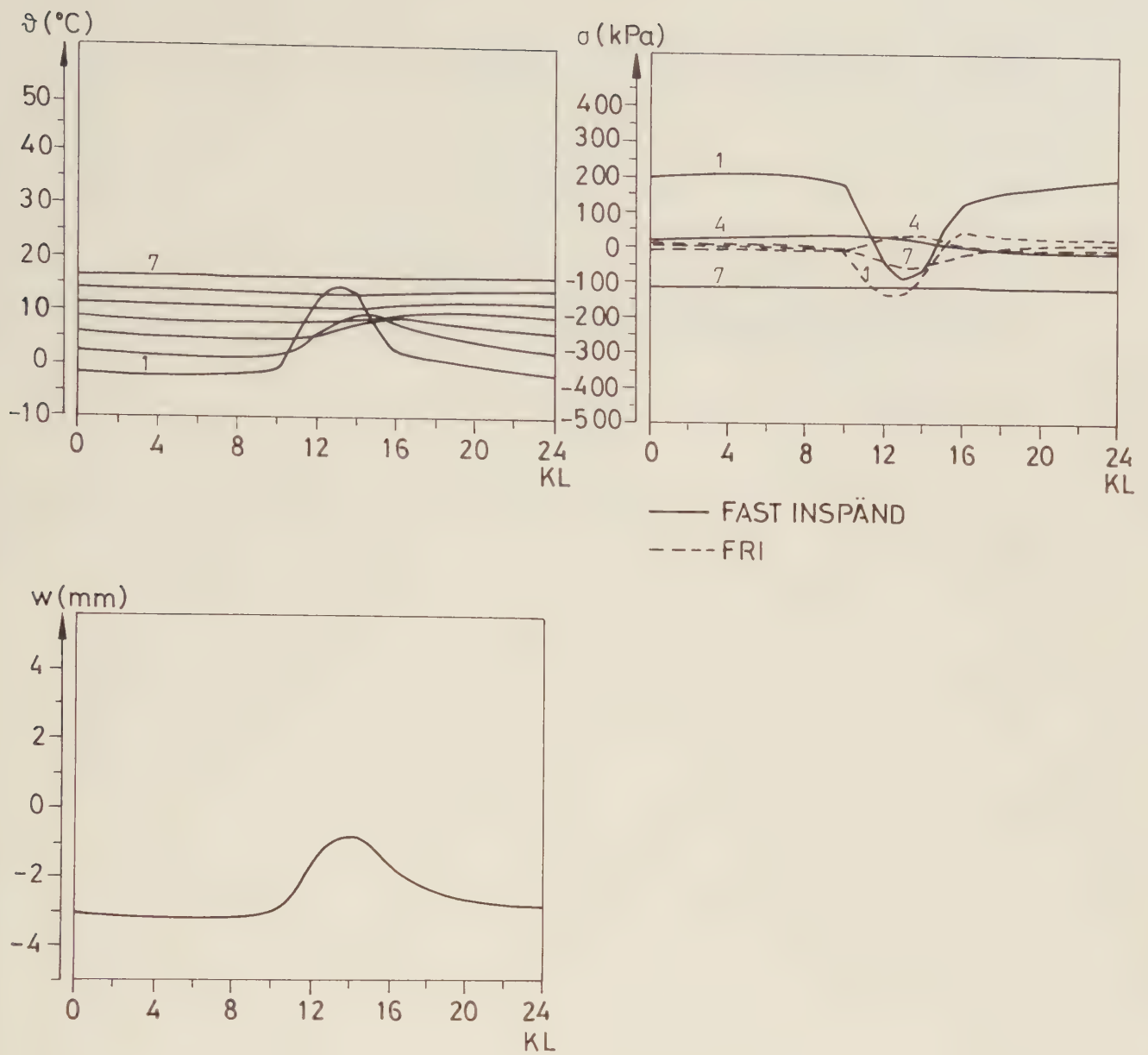


FIG 7.17. Temperaturförlopp, spänningar vid fast inspända respektive fria ränder samt utböjning i fri plattas mittnitt. 4/1 klart väder. $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg utan tilläggsisolering. Stockholm, södervägg.

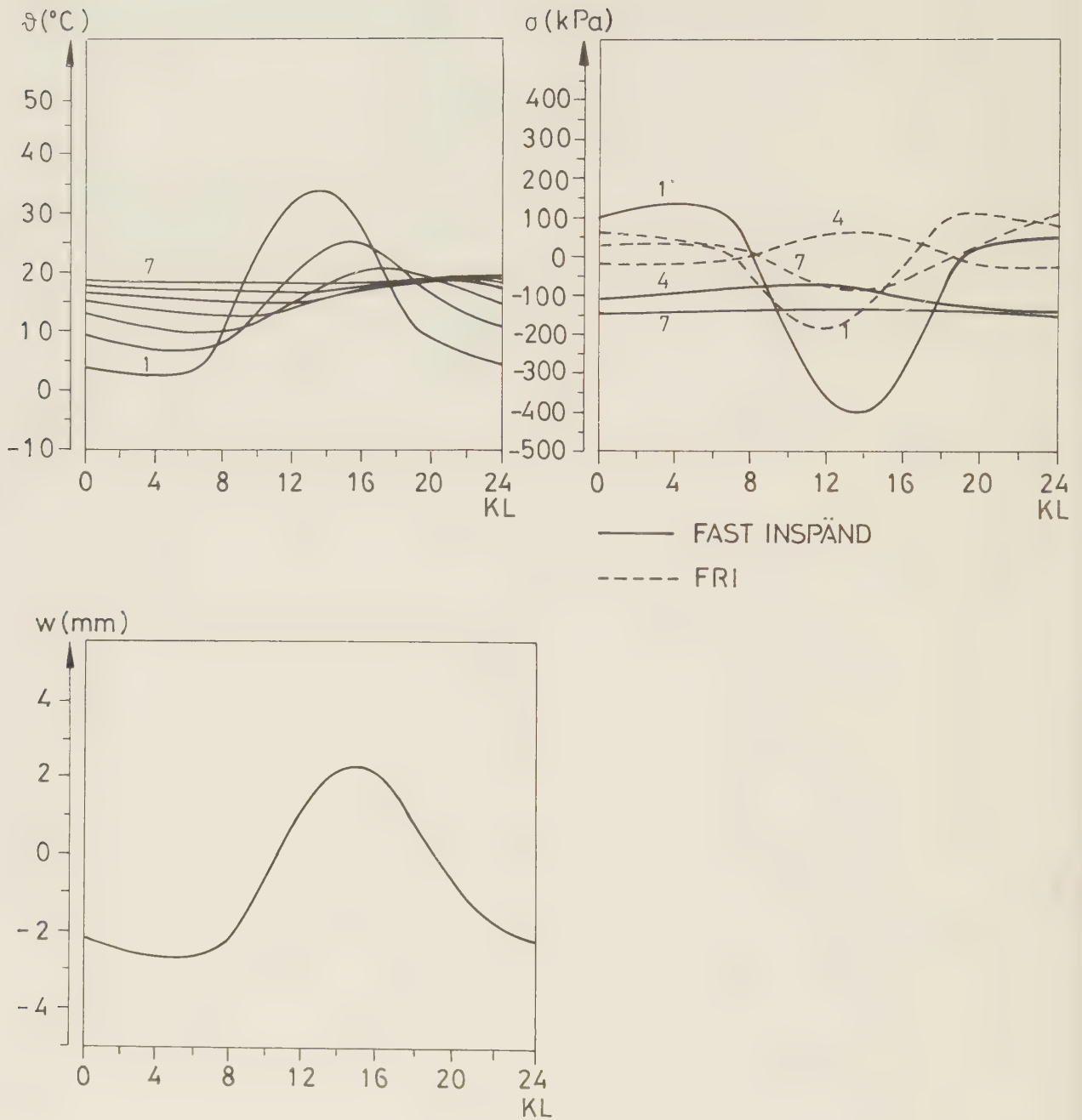


FIG 7.18. Temperaturförlopp, spänningar vid fast inspända respektive fria ränder samt utböjning i fri plattas mittsnitt. 4/4 klart väder. $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg utan tilläggsisolering. Stockholm, södervägg.

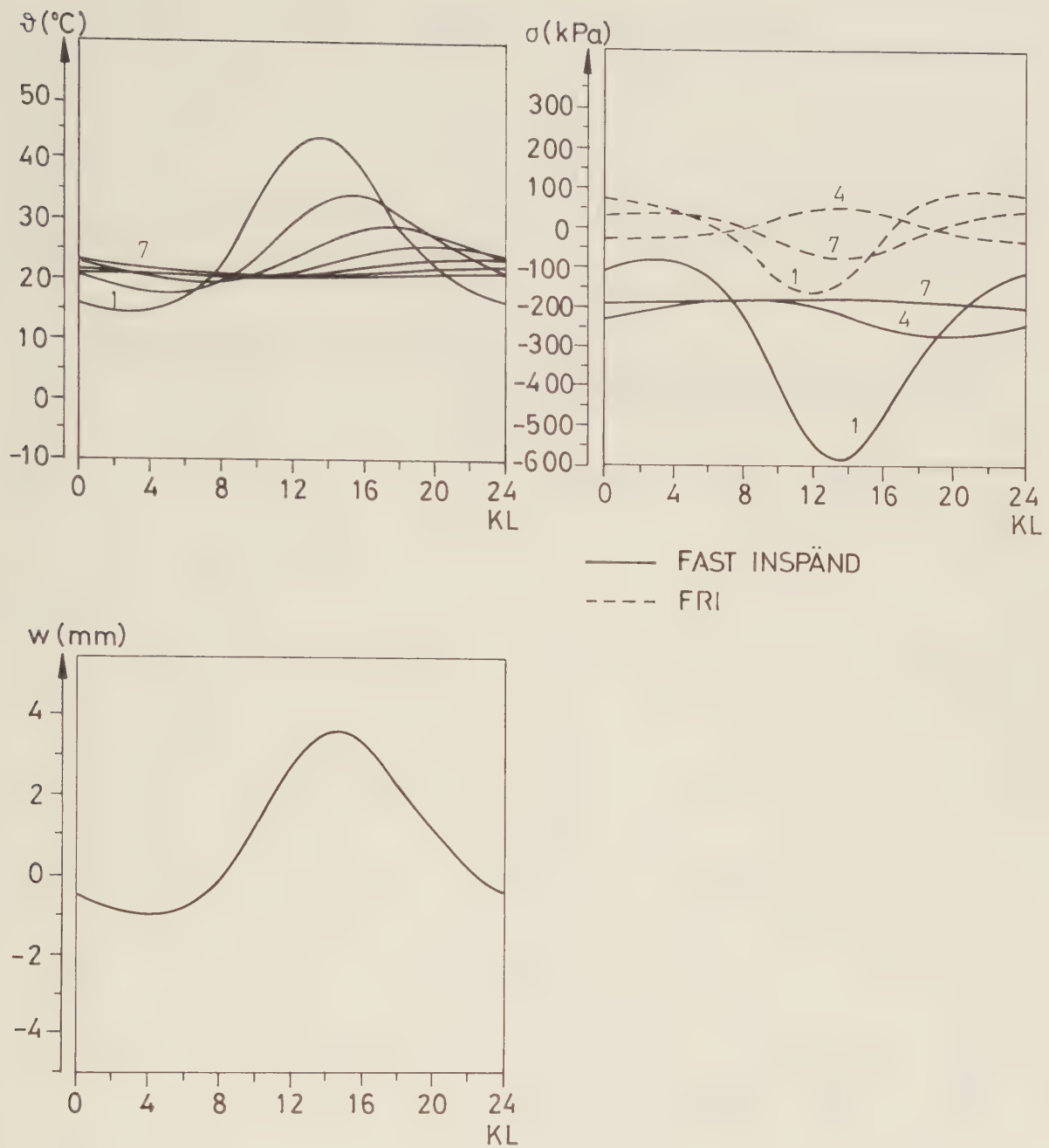


FIG 7.19. Temperaturförlopp, spänningar vid fast inspända respektive fria ränder samt utböjning i fri plattas mittnitt. 4/7 klart väder. 1½-stens tegelvägg utan tilläggsisolering. Stockholm, södervägg.

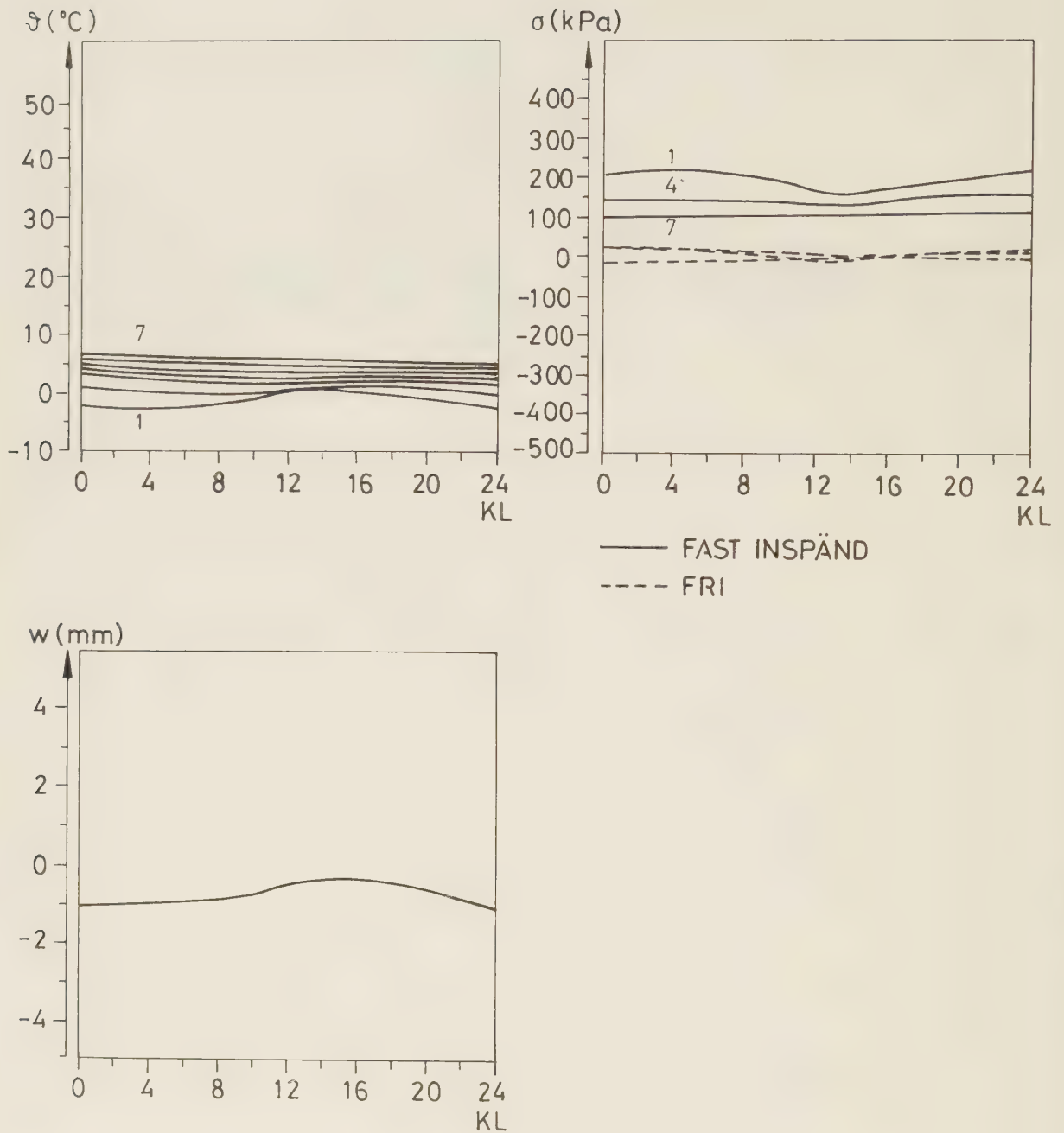


FIG 7.20. Temperaturförlopp, spänningar vid fast inspända respektive fria ränder samt utböjning i fri plattas mittsnitt. 2/1 mulet väder. $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg med 10 cm invändig isolering. Stockholm, södervägg.

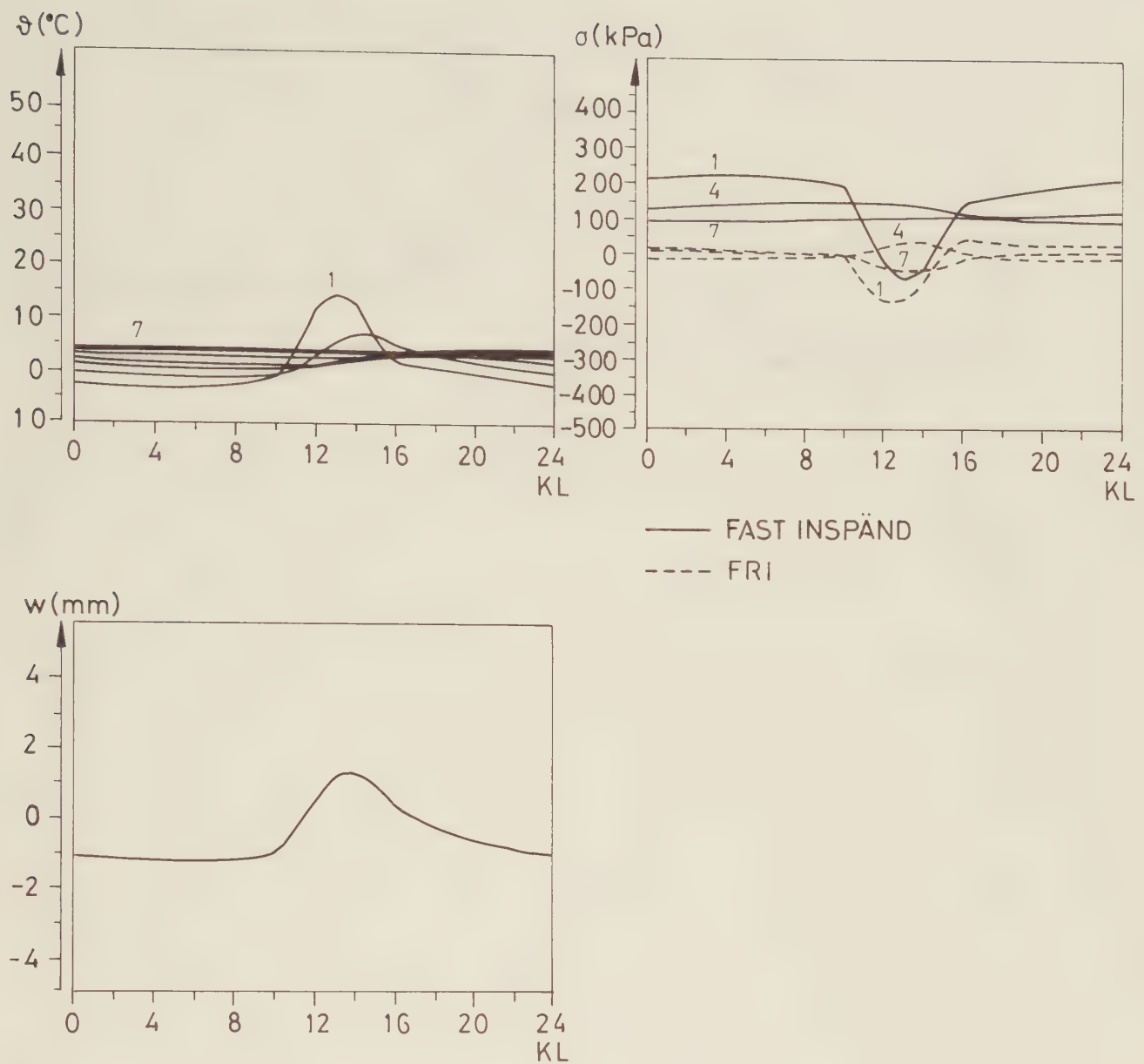


FIG 7.21. Temperaturförlopp, spänningar vid fast inspända respektive fria ränder samt utböjning i fri plattas mittsnitt. 4/1 klart väder. 1½-stens tegelvägg med 10 cm invändig isolering. Stockholm, södervägg.

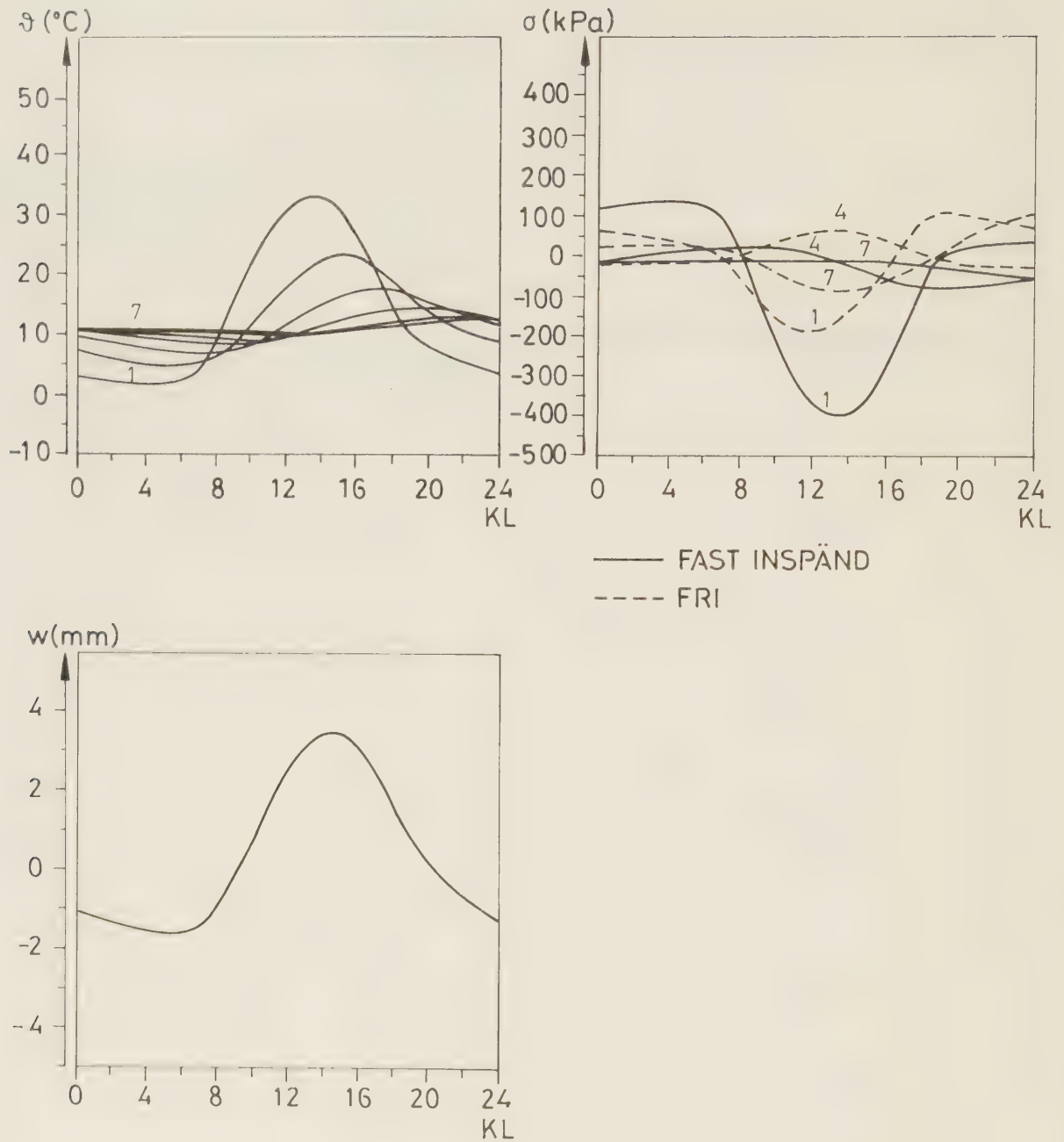


FIG 7.22. Temperaturförlopp, spänningar vid fast inspända respektive fria ränder samt utböjning i fri plattas mittnitt. 4/4 klart väder. $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg med 10 cm invändig isolering. Stockholm, södervägg.

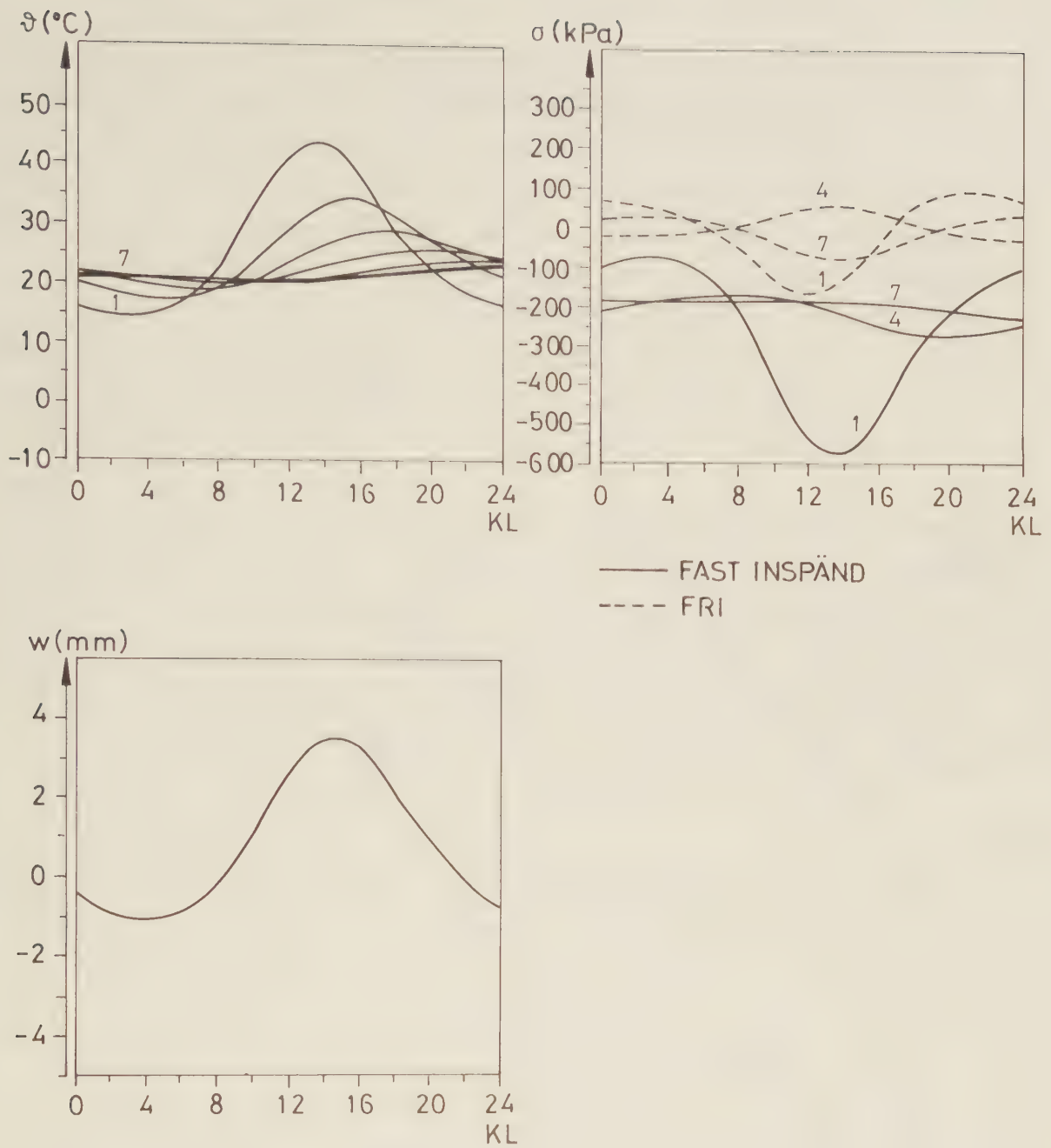


FIG 7.23. Temperaturförlopp, spänningar vid fast inspända respektive fria ränder samt utböjning i fri plattas mittsnitt. 4/7 klart väder. $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg med 10 cm invändig isolering. Stockholm, södervägg.

Antagande om fast inspänning av väggens ränder medför givetvis att spänningsförloppet exakt följer temperaturförloppet.

Då temperaturen är lägre än referenstemperaturen (10°C), uppkommer dragspänningar och i motsatt fall tryckspänningar. Den största beräknade spänningen (tryck- eller drag) under ett dygn uppkommer alltid i den del av väggen som är närmast uteluften, eftersom det är här de extrema temperaturerna uppträder vare sig det är en solig sommardag eller en kall vinternatt. Solstrålning mot väggen påverkar temperaturen, och därmed spänningen, mycket starkt. Eftersom den aktuella väggen har hög värmekapacitet påverkas de inre delarna inte så mycket av detta. Variationerna i spänning under ett dygn kan vara mycket stora. En klar vår- eller höstdag kan spänningen i ytskiktet variera i storleksordningen 500 kPa.

Antagande om fria ränder ger en mera komplicerad spänningsfördelning eftersom väggens olika skikt måste samverka i töjningen så att plana tvärsnitt bibehålls plana. Absolut sett är spänningarna oftast mindre än då man antar fast inspänning. En ofta förekommande spänningsfördelning över tvärsnittet är tryckspänningar i väggmitt och dragspänningar i de yttre delarna. Vid hög temperatur på väggens yta uppstår tryckspänningar i väggens ytskikt och dragspänningar i väggmitt.

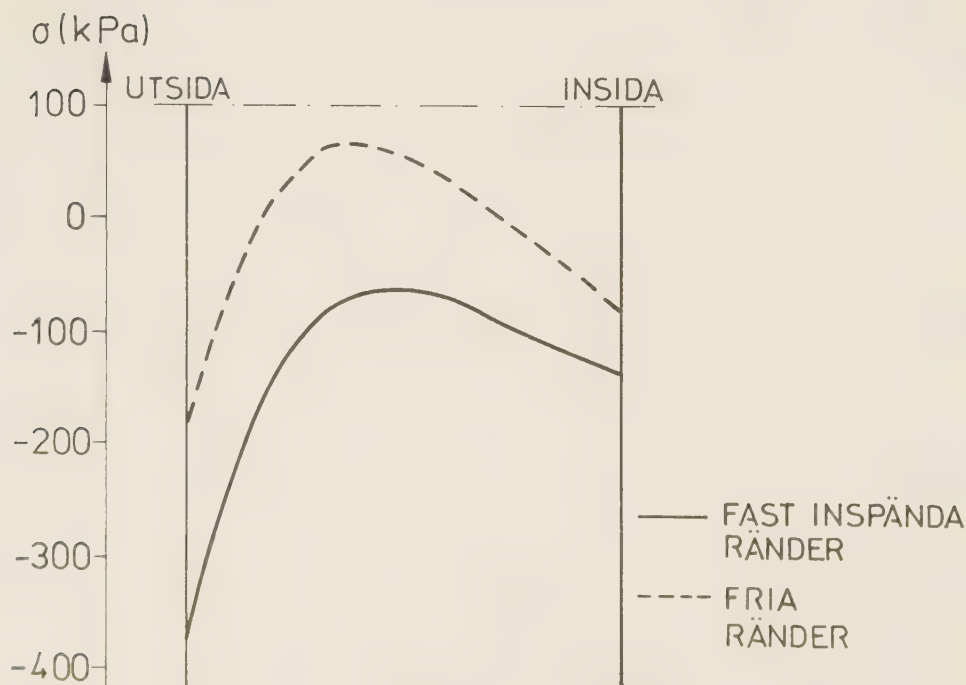


FIG 7.24. Exempel på spänningsfördelning i yttervägg med fast inspända respektive fria ränder. Endast temperaturbelastning. 4/4 kl 12, $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg utan invändig isolering.

Utböjningen av plattan med fria ränder varierar kraftigt över dygnet, speciellt vår- och höstdygn då ytemperaturvariationerna är stora.

Relativa längdändringen i olika delar av väggen, vid fria ränder, har också beräknats. I FIG 7.25 visas exempel på ett dygnsförlopp, för tre snitt i väggen.

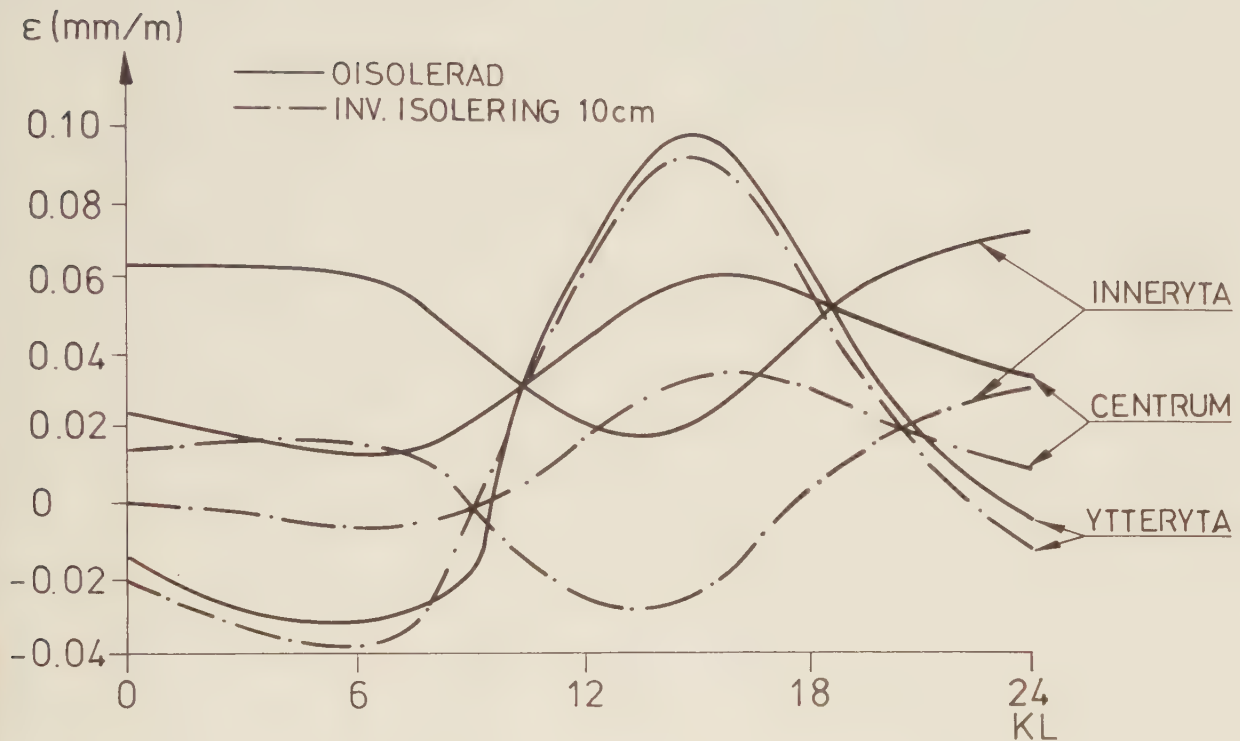


FIG 7.25. Relativ längdändring för olika skikt i $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg under ett vårdygn, 4/4 klart väder, Stockholm, södervägg.

Den invändiga tilläggsisoleringen har stor inverkan på temperaturförloppet i väggen och därmed spänningstillståndet. För vinterfallet gäller att hela väggen får låg temperatur och därmed blir utsatt för dragspänning, förutsatt att ränderna kan betraktas som oeftergivliga. Den maximala temperaturspänningen i väggen påverkas däremot mycket lite, eftersom den beror främst av uteluftens temperatur. Man får emellertid dragspänningar över hela tvärsnittet en kall dag, i en vägg som är invändigt isolerad.

Detta kan vara av betydelse om man har andra belastningar som påverkar väggen excentriskt. Om väggen antas ha fria ränder, blir maximala spänningen också i många fall vid ytterytan.

TAB 7.2 är en sammanställning av extremvärden under de betraktade dygnen. Av denna framgår, att maximala dragspänningen, då väggen är fast inspänd, ökar ca 5% på grund av tilläggsisoleringen. .

Om väggens ränder antas fria, fås de största temperaturspänningarna, och de största rörelserna under vår och höst. Skillnaden mellan isolerat och oisolerat tillstånd är mycket liten.

TABELL 7.2. Temperaturspänningar och -rörelser i 1½-stens tegelvägg, Stockholm, södervägg. Referenstemperatur 10 °C.

Dag	Isolering (cm)	Fasta ränder		Fria ränder	
		$\sigma_{\text{drag, max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{tryck, max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{drag, max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{tryck, max}}$ (kPa)
2/1	0	209,1	111,4	16,7	20,1
2/1	10	217,7	-	26,6	12,0
4/1	0	210,9	116,6	43,8	135,3
4/1	10	224,6	73,7	45,4	134,3
4/4	0	128,6	409,7	112,6	188,6
4/4	10	138,9	401,1	109,4	190,1
4/7	0	-	576,0	94,4	164,5
4/7	10	-	576,0	89,9	168,3
4/10	0	0,0	502,3	109,9	187,2
4/10	10	3,4	497,1	107,5	190,5

Fria ränder							
Dag	Isolering (cm)	ϵ_{max} (mm/m)	ϵ_{min} (mm/m)	$ \epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}} $ (mm/m)	w_{max} (mm)	w_{min} (mm)	$ w_{\text{max}} - w_{\text{min}} $ (mm)
2/1	0	0,042	-0,068	0,11	-2,7	-3,3	0,6
2/1	10	-0,005	-0,066	0,061	-0,4	-1,2	0,8
4/1	0	-0,046	-0,069	0,115	-0,8	-3,3	2,5
4/1	10	-0,013	-0,074	0,061	1,2	-1,3	2,5
4/4	0	0,094	-0,033	0,127	2,3	-2,7	5,0
4/4	10	0,093	-0,028	0,121	3,5	-1,6	5,1
4/7	0	0,162	0,035	0,127	3,6	-1,0	4,6
4/7	10	0,160	0,037	0,123	3,5	-1,1	4,6
4/10	0	0,129	0,01	0,119	3,0	-1,6	4,6
4/10	10	0,126	0,001	0,125	3,6	-1,0	4,6

TABELL 7.3. Bedömning av temperaturspänningars och -rörelsers årsvariationer med utgångspunkt från TAB 7.2.

Isolering (cm)	Fasta ränder		Fria ränder	
	$\sigma_{\text{drag,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{tryck,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{drag,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{tryck,max}}$ (kPa)
0	210,9	576,0	112,6	187,2
10	224,6	576,0	109,4	190,5

Fria ränder				
Isolering (cm)	$\Delta \epsilon_{\text{dygn,max}}$ (kPa)	$\Delta \epsilon_{\text{år}}$ (kPa)	$\Delta w_{\text{dygn,max}}$ (kPa)	$\Delta w_{\text{år}}$ (kPa)
0	0,127	0,231	5,0	6,9
10	0,125	0,234	5,1	5,2

Temperaturspänningarna är absolut sett stora, även om skillnaden på grund av en tilläggsisolering är liten. Som exempel kan man jämföra med den tryckspänning som egenvikten av en 10 m hög tegelpelare med tungheten 18 kN/m^3 ger i en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg

$$\sigma_{\text{EV}} = \frac{10 \cdot 0,38 \cdot 18}{0,38} = 180 \text{ kPa}$$

7.3.3 250 mm gasbetongvägg

Samma beräkningar har gjorts för en gasbetongvägg som för tegelväggen i föregående avsnitt. Väggen har även här antagits vara en södervägg i Stockholm. Beräkningar har dock inte gjorts för ett soligt vinterdygn, dvs 4/1 har uteslutits. Materialdata för gasbetongen har satts till

Värmeledningstal, $\lambda = 0,22 \text{ W/mK}$

Värmekapacitet $\gamma \cdot c_p = 540 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3\text{K}$

Temperaturutvidgningskoefficient, $\alpha = 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Elasticitetsmodul, $E = 750 \text{ MPa}$

Poissons tal, $\nu = 0,12$

Referenstemperaturen har satts till $+10^{\circ}\text{C}$. I FIG 7.26 och 7.27 visas exempel på beräkningar för gasbetongväggen utan tilläggsisolering respektive med invändig isolering ($m_{\text{isol}} = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$) den 4/4 som är ett klart värde. Väggens absorption för solstrålning har satts till 0,7.

De beräknade spänningarna är betydligt mindre för gasbetongen än för tegelväggen, vilket främst beror på den lägre E-modulen. Rörelserna då väggen antas ha fria ränder blir ganska stora, jämfört med tegelväggen, eftersom temperaturutvidgningskoefficienten är större och väggen är tunnare.

I TAB 7.4 och 7.5 har beräknade maximala spänningar och rörelser sammanställts. Härav framgår att den invändiga isoleringens inverkan på rörelser och på maximala spänningar i väggen är mycket liten.

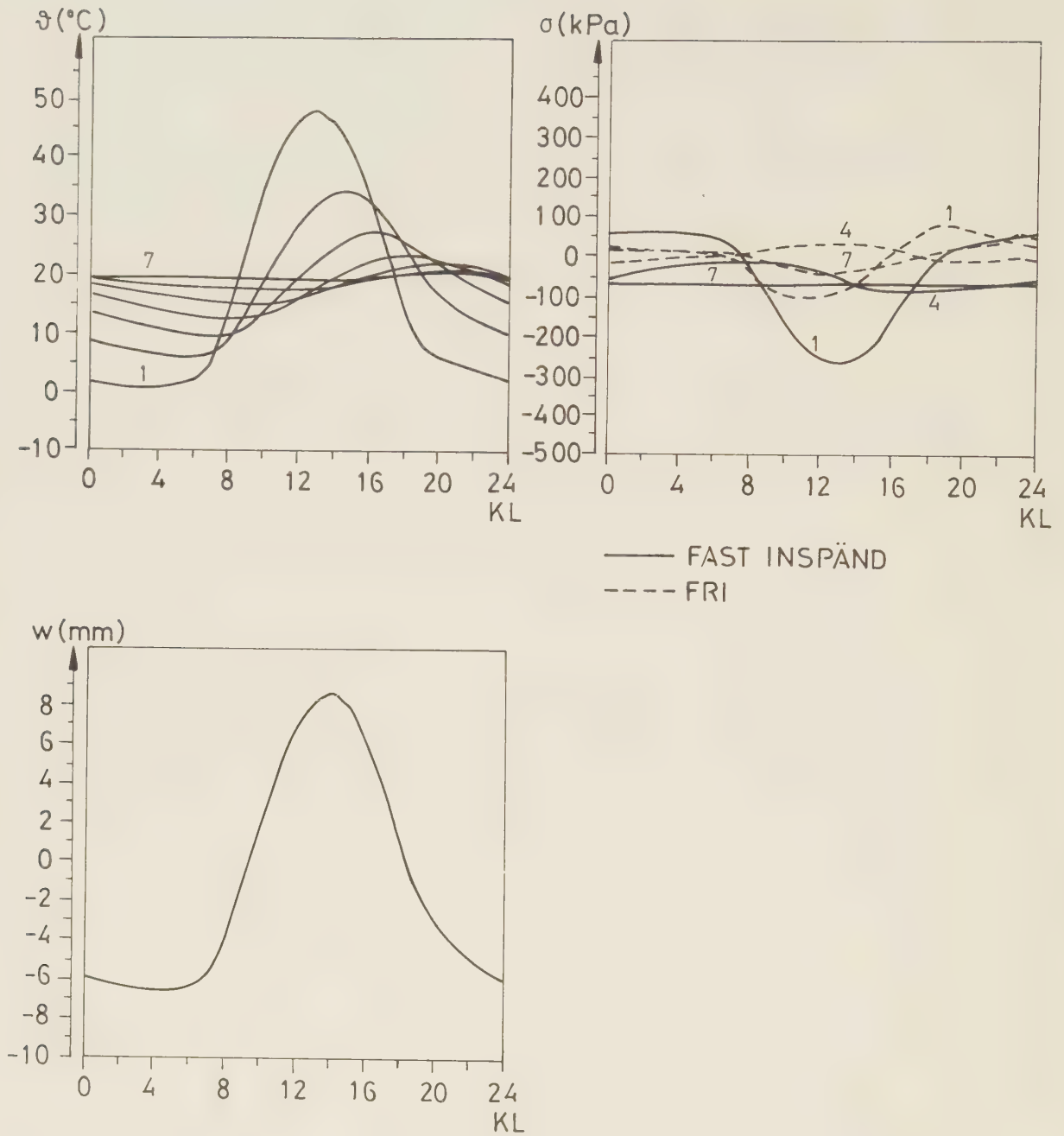


FIG 7.26. Temperaturförlopp, spänningar vid fast inspända respektive fria ränder samt utböjning i fri plattas mittsnitt. 4/4 klart väder. 250 mm gasbetongvägg utan tilläggsisolering. Stockholm, södervägg.

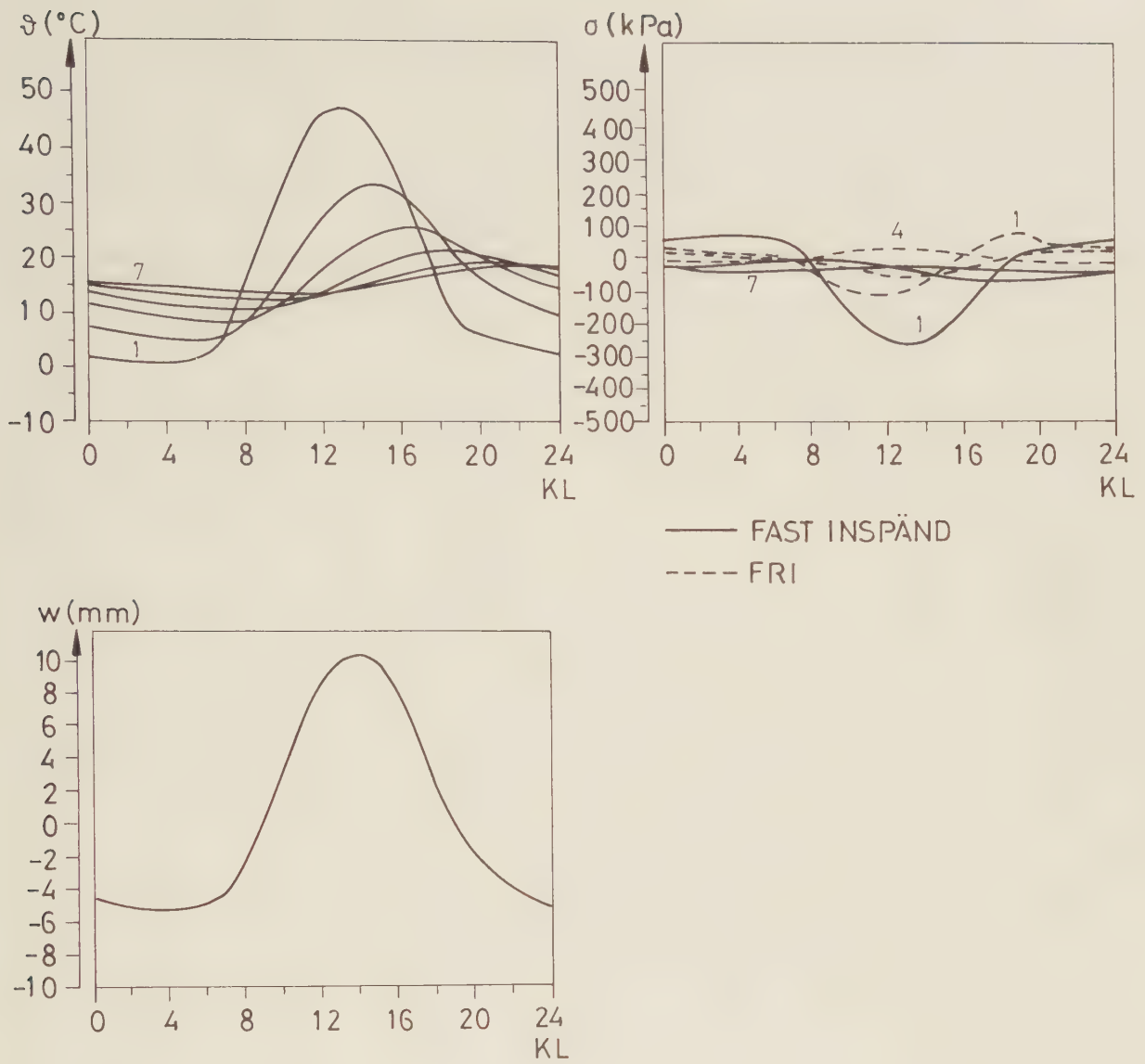


FIG 7.27. Temperaturförlopp, spänningar vid fast inspända respektive fria ränder samt utböjning i fri plattas mittnitt. 4/4 klart väder. 250 mm gasbetongvägg med 10 cm invändig isolering. Stockholm, södervägg.

TABELL 7.4. Temperaturspänningar och -rörelser i 250 mm gasbetongvägg. Stockholm, södervägg. Referenstemperatur 10 °C. w förutsätter väggfältets mått 5 x 8 m².

Dag	Inv.isol. (cm)	Fasta ränder		Fria ränder	
		$\sigma_{\text{drag,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{tryck,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{drag,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{tryck,max}}$ (kPa)
2/1	0	90,6	60,0	6,4	10,8
2/1	10	92,0	2,0	8,8	9,4
4/4	0	60,6	257,8	74,6	108,2
4/4	10	61,4	257,0	72,8	107,4
4/7	0	-	315,0	55,6	92,6
4/7	10	-	315,0	53,6	91,8
4/10	0	6,2	293,2	78,4	108,2
4/10	10	6,8	293,2	76,8	108,0

Fria ränder							
Dag	Inv. isol. (cm)	ϵ_{max} (mm/m)	ϵ_{min} (mm/m)	$ \epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}} $ (mm/m)	w_{max} (mm)	w_{min} (mm)	$ w_{\text{max}} - w_{\text{min}} $ (mm)
2/1	0	0,076	-0,102	0,178	-6,4	-7,8	1,4
2/1	10	0,010	-0,102	0,112	-3,0	-4,8	1,8
4/4	0	0,210	-0,052	0,262	8,8	-6,4	15,2
4/4	10	0,220	-0,054	0,274	10,4	-5,4	15,8
4/7	0	0,292	0,026	0,266	11,6	-2,4	14,0
4/7	10	0,292	0,042	0,250	11,0	-3,4	14,4
4/10	0	0,254	0,001	0,253	10,4	-3,8	14,2
4/10	10	0,254	0	0,254	11,6	-3,4	14,4

TABELL 7.5. Bedömning av temperaturspänningars och -rörelsers årsvariationer med utgångspunkt från TAB 7.4.

Inv.isol. (cm)	Fasta ränder		Fria ränder	
	$\sigma_{\text{drag,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{tryck,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{drag,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{tryck,max}}$ (kPa)
0	90,6	315,0	78,4	108,2
10	61,4	315,0	76,8	108,0

Inv.isol. (cm)	Fria ränder			
	$\Delta \epsilon_{\text{dygn,max}}$ (mm/m)	$\Delta \epsilon_{\text{år}}$ (mm/m)	$\Delta w_{\text{dygn,max}}$ (mm)	$\Delta w_{\text{år}}$ (mm)
0	0,266	0,394	15,2	19,4
10	0,266	0,394	15,8	16,4

Det vore i detta sammanhang naturligtvis mycket intressant att känna till murverks draghållfasthet, så att man kunde förutsäga när det finns risk för att sprickor slår upp. Litteraturuppgifterna på detta område är emellertid mycket knapphändiga.

7.4 TEMPERATURSPÄNNINGAR I YTTERVÄGG AV $1\frac{1}{2}$ -STENS TEGEL. KOMPLETTERANDE BERÄKNINGAR MED FINITA ELEMENTMETODEN

Som komplettering till de i KAP 7.3.2 redovisade beräkningarna har gjorts några beräkningar med finita elementmetoden. De fall som studerats är

1. Spänningsfördelning invid randen i en fritt upplagd balk, temperaturgradient endast i tjockleksriktningen.
2. Inverkan av temperaturgradient i väggens plan, dvs vinkelrätt mot tjockleksriktningen.
3. Spänningar vid en fönsteröppning, temperaturgradient i tjockleksriktningen.

Materialdata antas enligt tidigare. Beräkningarna i detta avsnitt har gjorts med datorprogrammet EUFEMI, utvecklat vid institutionen för Hållfasthetslära, LTH, (Hernelind et al (1977)). Principerna för spänningsanalys med finita elementmetoden finns utförligt beskrivna i litteraturen, se t ex Zienkiewicz (1971).

7.4.1 Spänningar vid randen av en fritt upplagd balk

Den modell som använts visas i FIG 7.28.

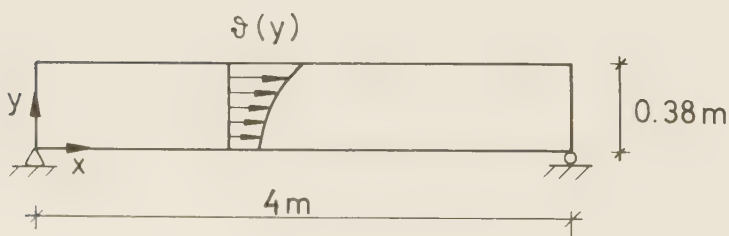


FIG 7.28. Modell för beräkning av temperaturspänningar i fritt upplagd balk. Temperaturgradient endast i y-riktningen.

Vid finita elementberäkningen har elementindelningen gjorts tät i närheten av upplagen. Den betraktade temperaturgradienten är kraftig och motsvarar ett typiskt fall med solstrålning på en yttervägg sommartid. I FIG 7.29 är temperaturfördelningen angiven i förhållande till referenstemperaturen, 10°C . Redovisningen av beräknade spänningar har inskränkts till σ_x . Normalspänningen i tre snitt visas. Dessa snitt motsvarar tyngdpunkterna i elementen närmast ytskikten och i centrum av balken. Randens inverkan på spänningsfördelningen är märkbar inom ett område som är ungefär lika med balkens höjd. Här förekommer icke försumbara σ_y och τ_{xy} .

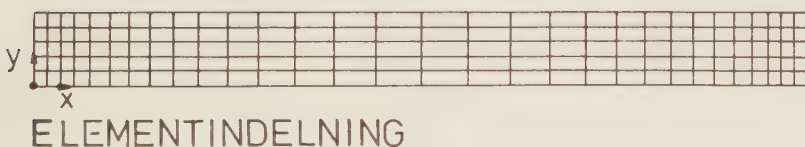
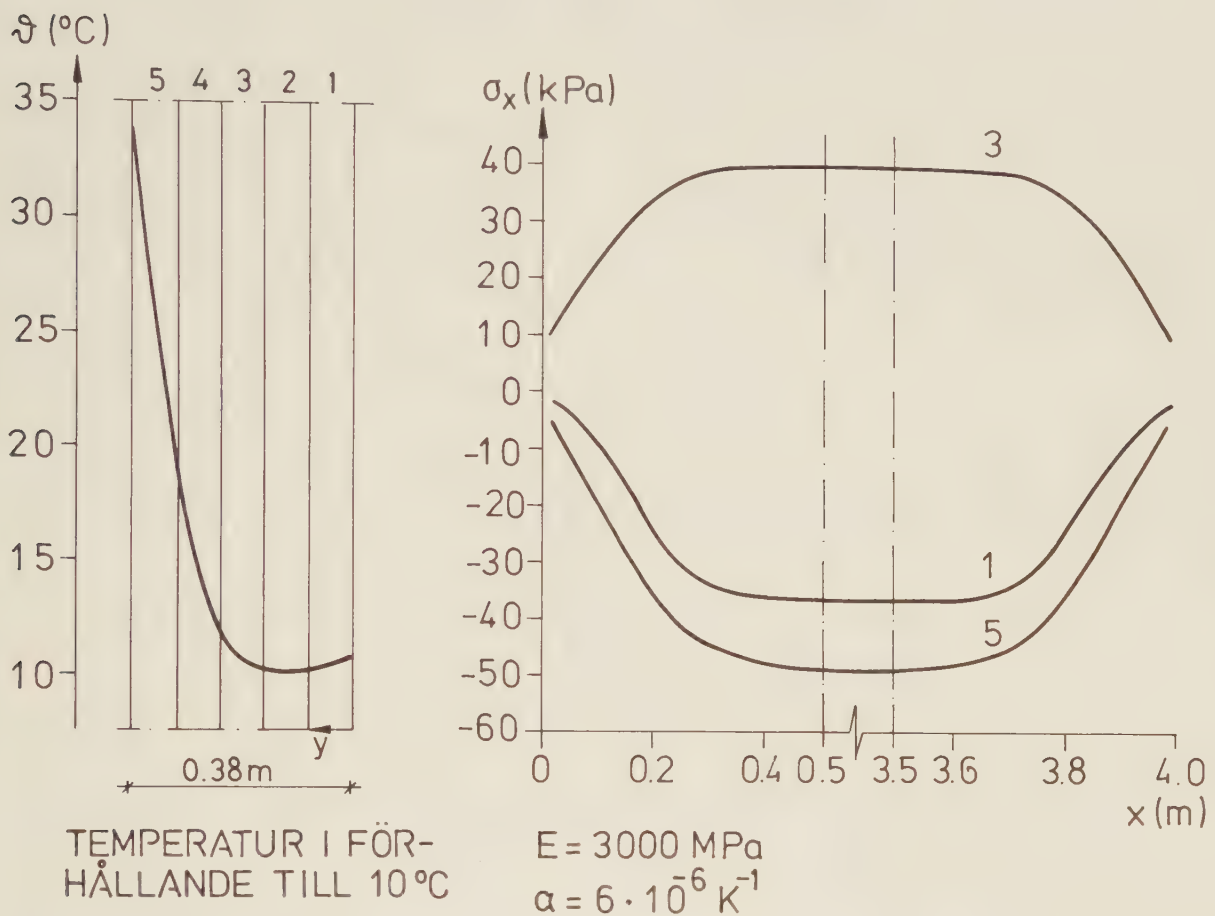


FIG 7.29. Temperaturspänningar i fritt upplagd balk, beräknade med finita elementmetoden.

7.4.2 Spänningar vid temperaturgradient i längsriktningen av en fritt upplagd balk

Modellen är samma som i föregående beräkning. I byggnadstekniska sammanhang är temperaturvariationer i längsriktningen av en yttervägg små, jämfört med variationerna i tjockleksriktningen. De förekommer emellertid vid köldbryggor, då angränsande utrymmen har olika innetemperatur och då byggnaden är delvis solbelyst.

Den temperaturgradient som betraktats här är relativt liten, från -5°C till -10°C på en längd som är 0,5 m. Variationen är olinjär. I övriga delen av balken, 0,5-4 m från vänstra upplaget, är temperaturen konstant lika med -10°C . Detta är en ganska realistisk temperaturvariation orsakad av en köldbrygga i en yttervägg av denna typ. Vid delvis solbelysta väggar kan temperaturvariationen i väggens plan säkert bli större. Temperaturgradienten över balkens höjd har satts lika med noll.

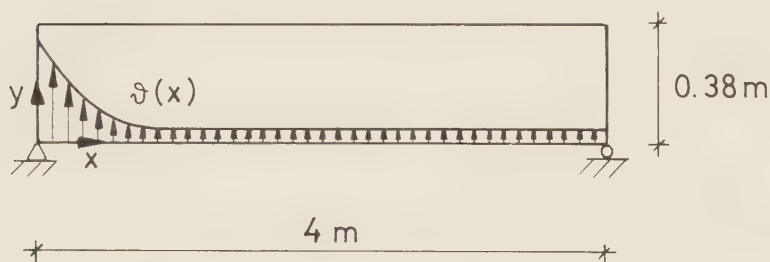


FIG 7.30. Modell för beräkning av temperaturspänningar i fritt upplagd balk. Temperaturvariation endast i x-riktningen.

I FIG 7.31 visas temperaturgradienten samt spänningskomponenterna σ_x och σ_y . Elementindelningen är samma som i föregående fall. Spänningarna är beräknade i elementens tyngdpunkter. En linje parallellt med x-riktningen på balkens halva höjd är en symmetrilinje. Spänningarna har ritats upp med början en bit från randen. Vid själva randen fås ofta felaktiga värden beroende på oegentligheter i beräkningsförfarandet. Det är tänkbart att vissa knyckar på de uppritade kurvorna också kan förklaras av detta. Spänningstillståndet är tvådimensionellt beroende på randeffekterna. Beräknade spänningar är mycket små jämfört med tidigare redovisade fall och kan troligen försummas om temperaturgradienterna inte är betydligt kraftigare än vad här antagits.

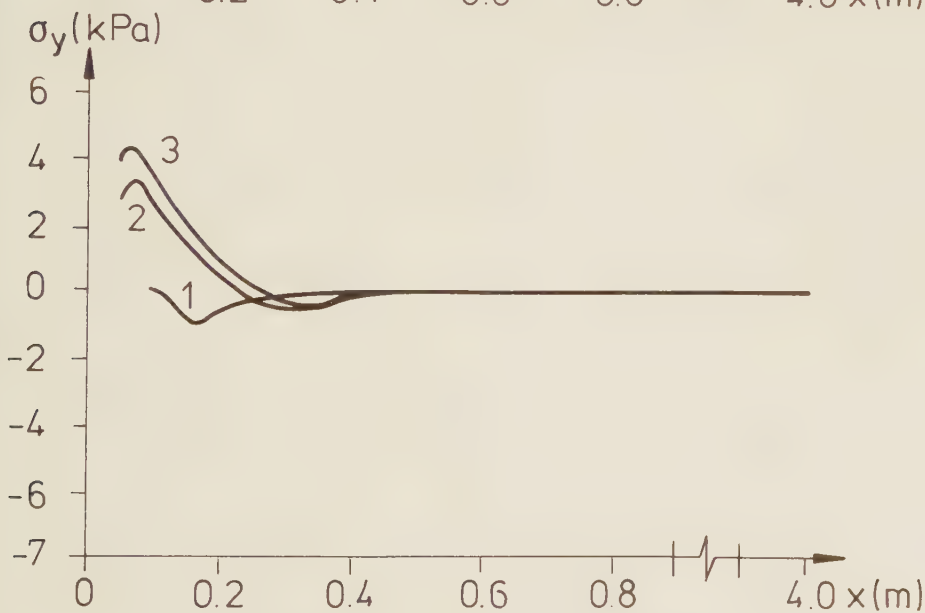
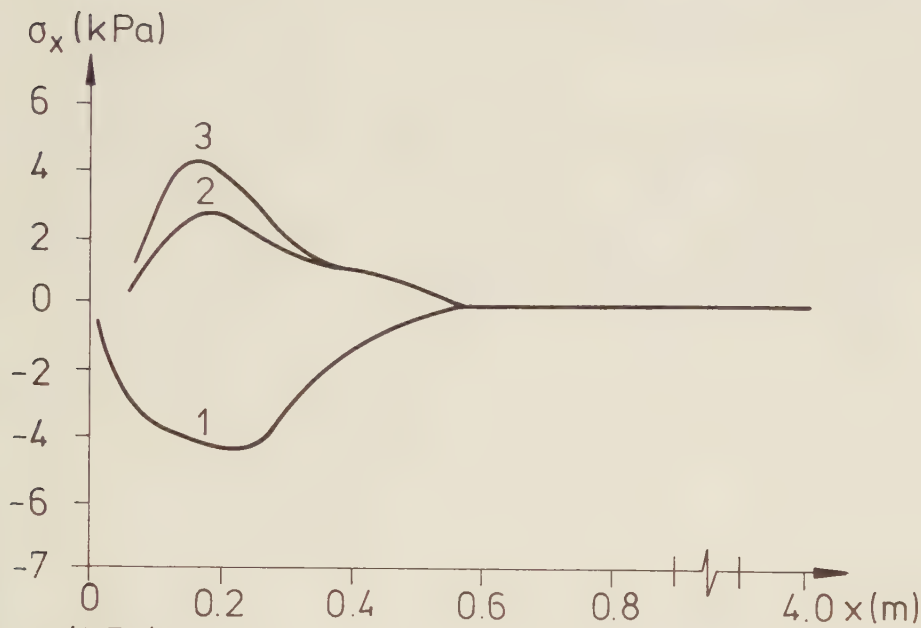
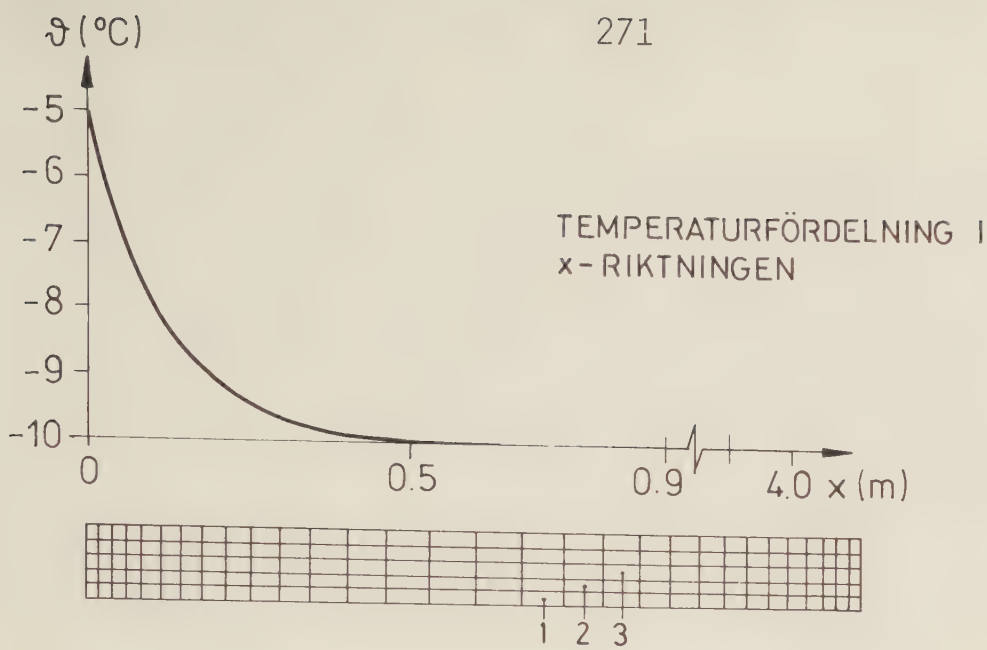
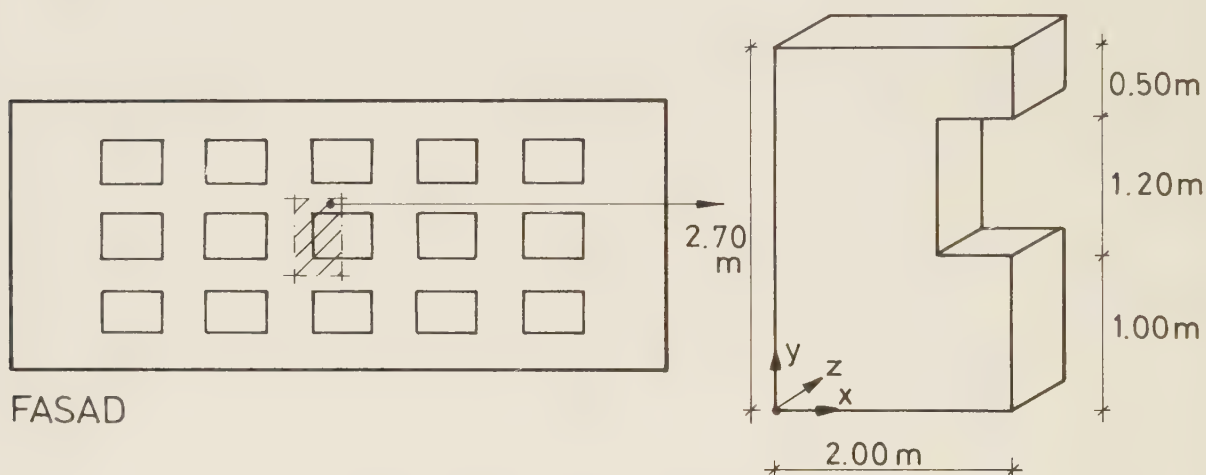


FIG 7.31. Temperaturspänningar i fritt upplagd balk vid temperaturvariation endast i längsriktningen. Beräkning med finita elementmetoden.

7.4.3 Spänningar vid fönsteröppning

Vid öppningar i en vägg uppträder spänningskoncentrationer. Finita elementmetoden kan med fördel användas för att studera sådana fall. I detta avsnitt har gjorts en beräkning av förhållandena kring en fönsteröppning vid homogen temperatursänkning i hela väggen. I FIG 7.32 visas den betraktade strukturen. Denna består av en del av ett väggfält, ungefär rumsstort, där de horisontella ränderna antagits oförskjutbara i y-riktningen och de vertikala i x-riktningen. Detta är ett något orealistiskt villkor. För att få ett mera realistiskt spänningstillstånd bör en större del av fasaden betraktas med beaktande av rimliga randvillkor.



7.32. Del av yttervägg med fönsteröppning. Del av struktur medtagen i beräkning av temperaturspänningar med finita elementmetoden.

Väggen består av $1\frac{1}{2}$ -stens tegel med materialdata enligt tidigare. I finita elementberäkningen har skivelement använts. Detta medför plant spänningstillstånd samt att temperaturgradient i väggens tjockleksriktning inte kan beaktas. För en invändigt tilläggsisolerad vägg kan detta troligen vara en rimlig approximation, för en oisolerad vägg mera tveksam. I det betraktade fallet har samma temperatur antagits i hela väggfältet, 20°C lägre än referenstemperaturen. Det är i sådana här fall möjligt att ta hänsyn till temperaturgradienter i väggens plan, till exempel vid fönsteröppningen och längs ränderna där man kan förvänta sig att köldbryggor förekommer. Detta har inte gjorts här. Eftersom det för aktuella material är dragspänningar som är kritiska kan köld-

bryggorna ha en viss positiv inverkan på spänningstillståndet, eftersom väggens temperatur i allmänhet är högst här. Detta gäller för de flesta typer av köldbryggor i invändigt isolerade väggar.

I FIG 7.33 visas största huvudspänningen i väggfältet. Vid hörnen uppträder kraftiga spänningskoncentrationer. Den övre bilden är gjord med ett interpolationsförfarande vilket i detta fall har gett ett något felaktigt resultat vid fönstrets övre hörn. Spänningskoncentrationens förskjutning en bit under själva hörnet motsvaras inte av beräknade värden. I FIG 7.33 har därför också lagts in den beräknade största huvudspänningen i elementraden närmast fönsteröppningen. De visade spänningarna gäller för elementens tyngdpunkter.

Temperaturspänningar verkar aldrig ensamma på en byggnadsdel, utan adderas till spänningar orsakade av andra belastningar. Då draghållfastheten överskrids i någon del av strukturen måste problemet behandlas med andra metoder som tar hänsyn till bland annat utbredningen av eventuella sprickor.

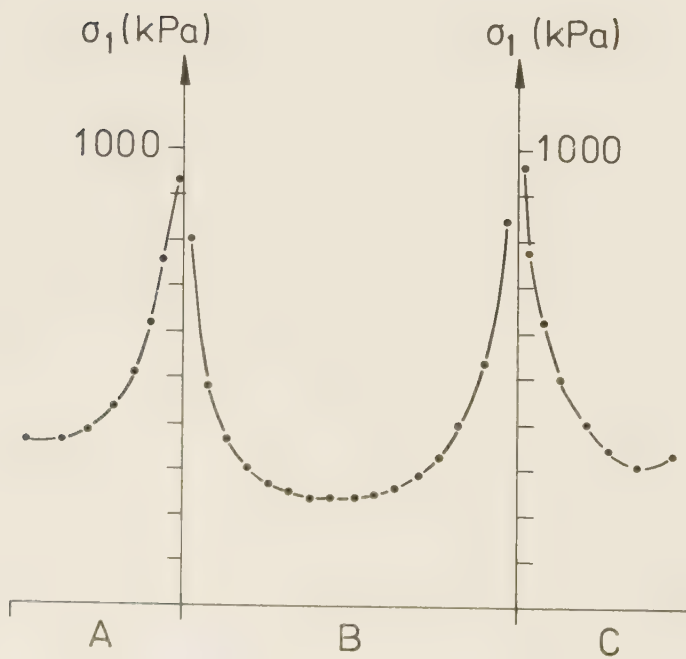
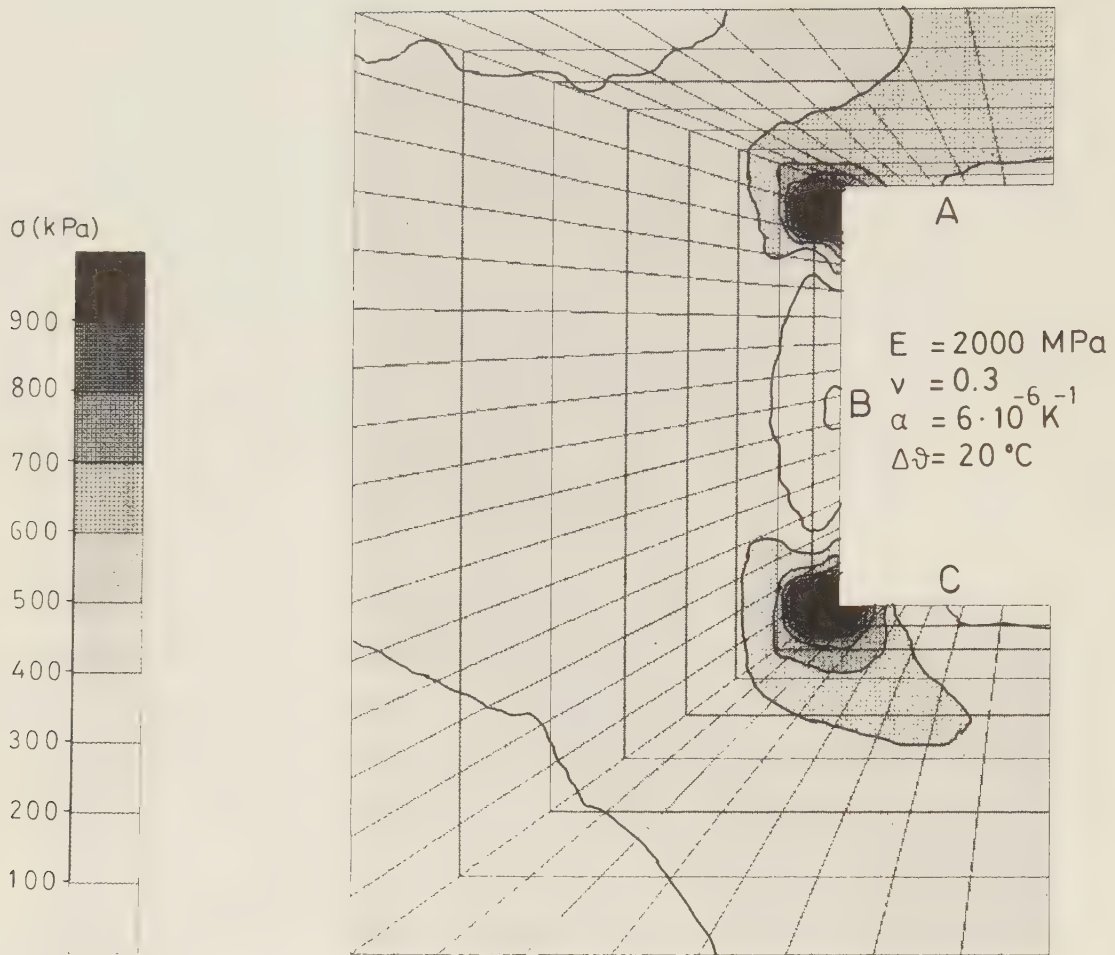


FIG 7.33. Största huvudspänningen i ytterväggsfält med fönsteröppning vid temperatursänkning i hela väggfältet.

7.5 TEMPERATURSPÄNNINGAR I YTSKIKT AV PUTS

För puts på befintliga väggar finns två intressanta typfall. Det ena är då underlaget kan anses orörligt och det andra då underlaget rör sig och tvingar ytskiktet att följa med.

Ett fall som inte behandlas i denna rapport är puts på ett rörligt isolerskikt som är i kontakt med ett fast underlag. Detta är aktuellt vid utvändig tilläggsisolering av befintliga ytterväggar då det nya ytskiktet skall vara puts. Fallet har behandlats av Elmarsson och Nevander (1978).

7.5.1 Puts på icke deformerbart underlag

I ett putsfält som utsätts för temperaturhöjningen ϑ_1 över referens-temperaturen ϑ_0 , och som har ett orörligt underlag, blir temperaturspänningen på grund av förhindrad rörelse

$$\sigma = - \frac{E}{1 - \nu} (\vartheta_1 - \vartheta_0)$$

Vid randen av ett putsfält, t ex vid en fog eller en spricka uppträder ett flerdimensionellt spänningstillstånd. Spänningen kan här avvika kraftigt från vad den är ute i putsfältet. Detta är helt avgörande för beständigheten. Då sprickor börjat slå upp kan första ordningens teori inte användas. I denna rapport betraktas emellertid endast förhållandena vid osprucket material.

I FIG 7.34 visas resultatet av spänningsberäkning med finita elementmetoden. Putsskiktet har antagits vara ett 30 mm tjockt skikt som delats in i två element i höjddled. I längsled har elementindelningen gjorts tätast nära randen.

Temperaturen har antagits vara samma i hela putsskiktet. De materialdata som valts har ansetts ungefär representativa för ett K-bruk. Beräknade spänningar har angivits per grads temperaturändring. Inverkan av randen är i detta fall märkbar ca 10-15 cm från denna. Största huvudspänningen är här betydligt större än spänningen längre ut i putsfältet. Skjuvspänningen mellan puts och underlag är också stor nära randen.

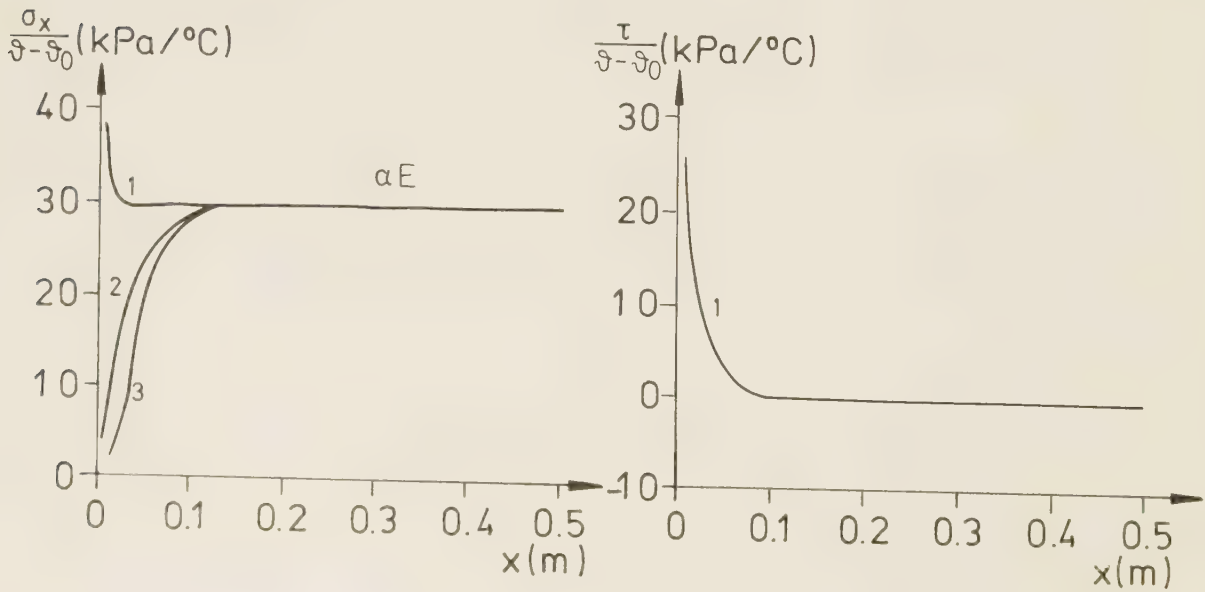
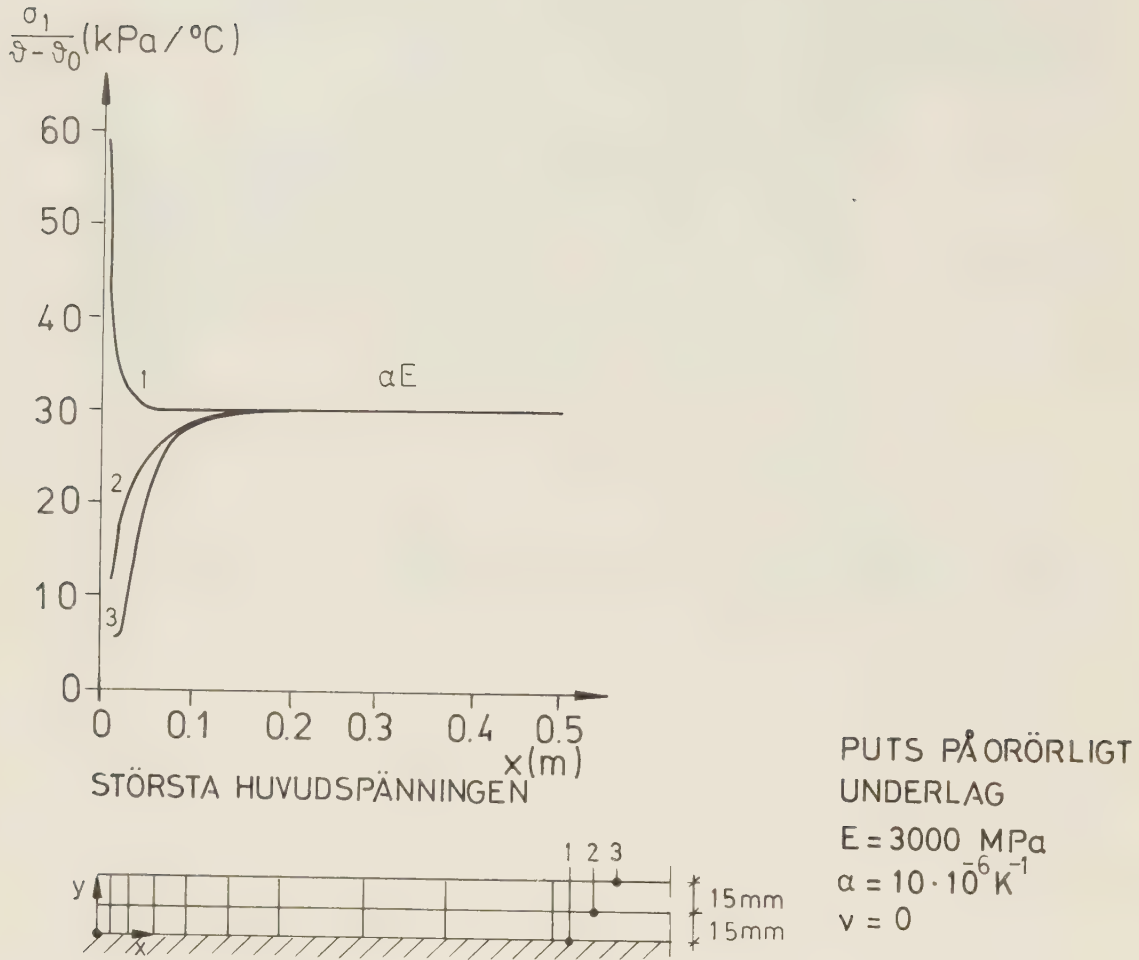


FIG 7.34. Temperaturspänningar i puts på fast underlag. Beräkning med finita elementmetoden.

Av Saretok (1957) anges som ungefärliga värden på skjuvhållfastheten för kalkputs ca 50 - 100 kPa och för kalkcementputs ca 100 - 270 kPa, enligt nordiska mätningar. Mot bakgrund av detta förefaller det troligt att temperaturspänningar kan vara en vanlig orsak till skador i puts.

Det finns emellertid ingen anledning att anta att invändig tilläggsisolering skulle ha någon större betydelse för temperaturspänningarna i ett putsskikt. Yttertemperatures förändring vid invändig tilläggsisolering är mycket liten. I KAP 6 visades beräkningar av yttertemperatur på en tegelvägg med och utan invändig tilläggsisolering under några vinterdygn. Skillnaden i yttertemperatur mellan den oisolerade och den invändigt isolerade väggen var vid denna beräkning högst 1-1,5 °C. Vid höga utetemperaturer och solstrålning på en vägg är skillnaden mellan oisolerat och isolerat tillstånd ännu mindre. Detta framgår av FIG 7.35, där yttertemperaturen på en vägg visas för ett par vår- och sommar dygn med varierande molnighet. Väggen är en södervägg, uteklimat för Stockholm normalåret 1931-60, 1½-stens tegel med absorption för solstrålning satt lika med 0,7. Detta är samma fall som använts vid beräkning av temperaturspänningar i homogena ytterväggar, KAP 7.3.2.

Det är allmänt känt att mycket höga yttertemperaturer kan erhållas vid solstrålning mot fasader och tak. Ett exempel på detta visas i FIG 7.36, som innehåller uppmätta yttertemperaturer under några soliga dygn i slutet av mars. Väggen är en södervägg i Skåne, putsad med vit puts.

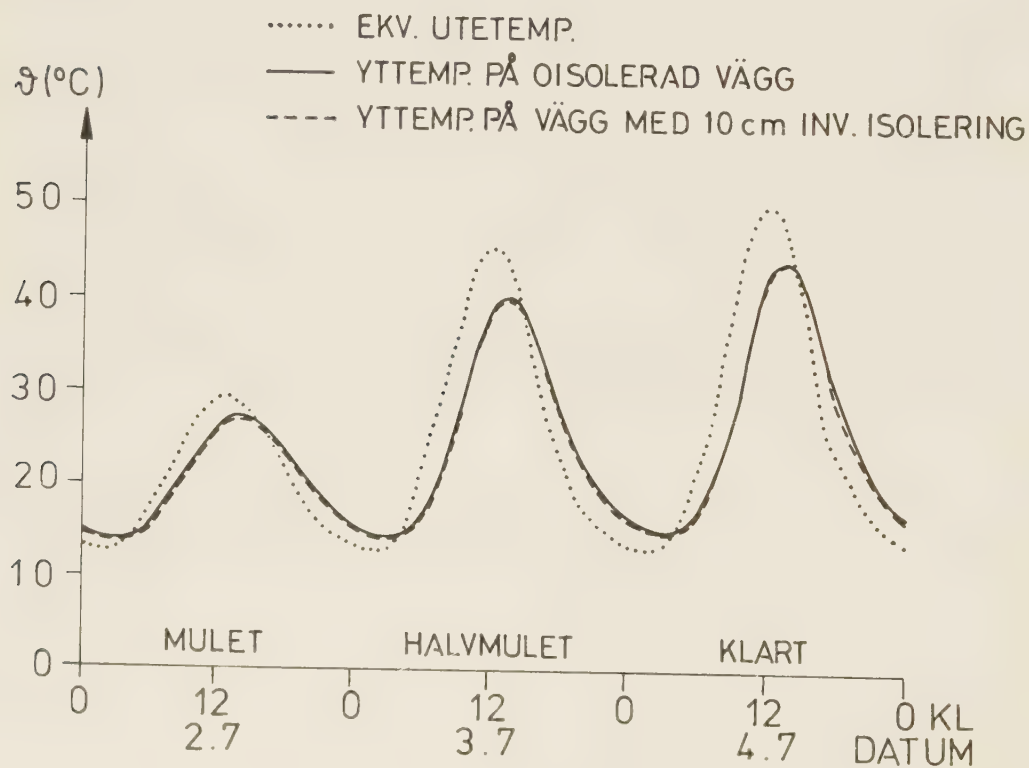
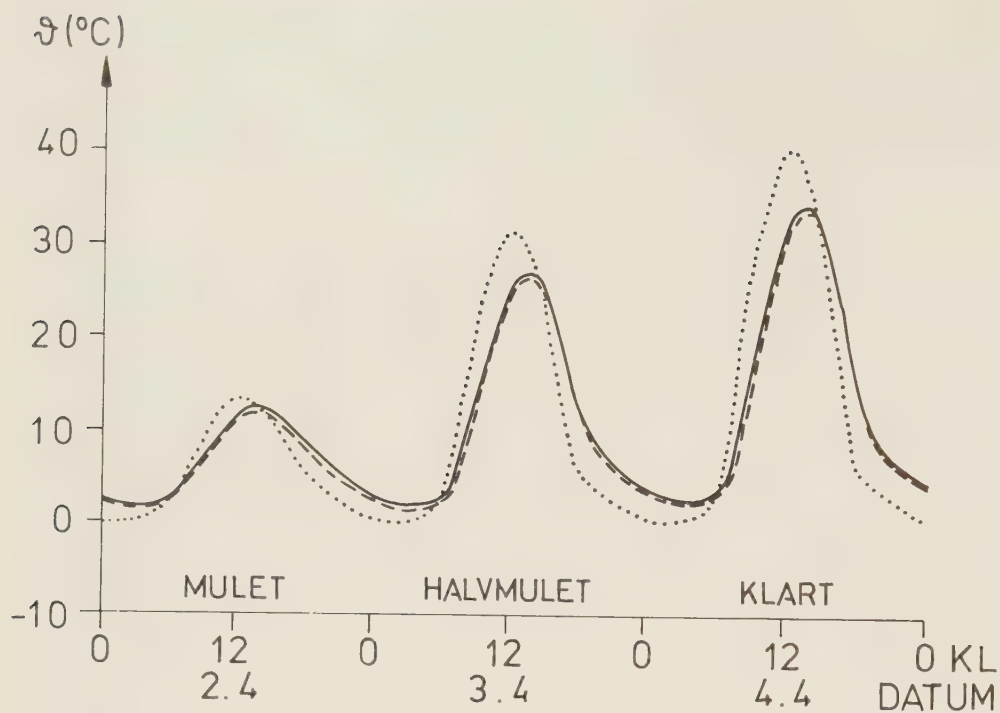


FIG 7.35. Yttertemperatur på oisolerad och invändigt tilläggsisolerad yttervägg. Beräknade värden för Stockholm, södervägg av $1\frac{1}{2}$ -stens tegel med $a = 0,7$.

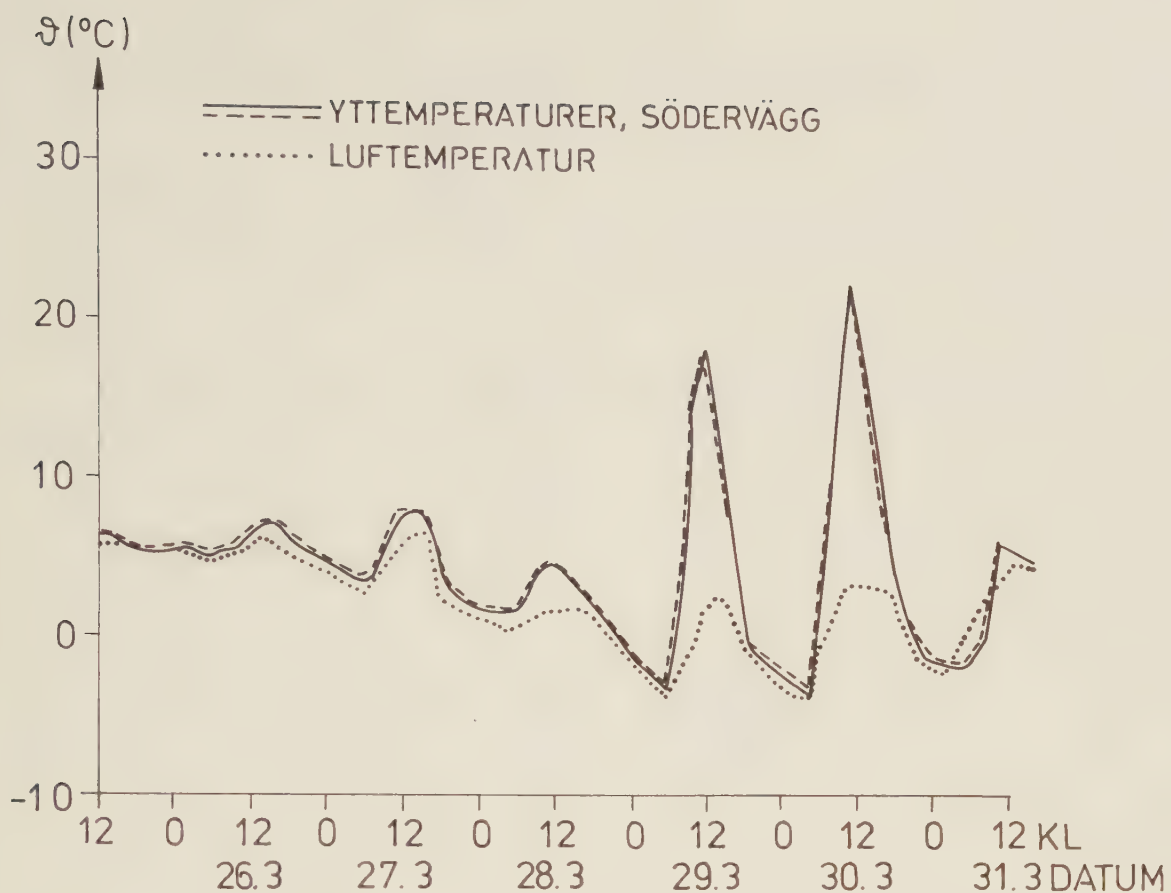


FIG 7.36. Uppmätta temperaturer på ljus södevägg, Borgeby, mars 1977.

7.5.2 Puts på deformerbart underlag

Om den putsade väggen kan röra sig tvingas puts och underlag att samverka. Vid en temperaturvariation $\vartheta_1(y)$, större än referenstemperaturen ϑ_0 blir spänningen i puts respektive underlag i ett endimensionellt fall (se även FIG 7.37)

$$\sigma_1 = -\alpha_1 E_1 (\vartheta_1(y) - \vartheta_0) + \frac{N}{A_{1f}} + \frac{M \cdot y}{I_f \cdot E_1/E_2}$$

$$\sigma_2 = -\alpha_2 E_2 (\vartheta_1(y) - \vartheta_0) + \frac{N}{A_{2f}} + \frac{M \cdot y}{I_f}$$

där

$$N = A_1 \int \alpha_1 E_1 (\vartheta_1(y) - \vartheta_0) dA + A_2 \int \alpha_2 E_2 (\vartheta_1(y) - \vartheta_0) dA$$

$$M = A_1 \int \alpha_1 E_1 (\vartheta_1(y) - \vartheta_0) \cdot y dA + A_2 \int \alpha_2 E_2 (\vartheta_1(y) - \vartheta_0) \cdot y dA$$

Böjningsaxeln ligger på avståndet

$$y_0 = \frac{h_2^2/2 + \frac{E_1}{E_2} \cdot h_1 h_2 + h_1^2/2}{h_2 + \frac{E_1}{E_2} h_1} \quad \text{från undersidan av balken}$$

$$A_{1f} = A_1 + \frac{E_2}{E_1} \cdot A_2$$

$$A_{2f} = A_2 + \frac{E_1}{E_2} \cdot A_1$$

$$I_f = \frac{1}{12} b \left(\frac{E_1}{E_2} h_1^3 + h_2^3 \right) + b \left(\frac{E_1}{E_2} h_1 \left(h_2 + \frac{h_1}{2} - y_0 \right)^2 + h_2 \left(h_2/2 - y_0 \right)^2 \right)$$

Siffrorna 1 och 2 betecknar ytskikt (puts) respektive underlag. b är tvärsnittets bredd, samma för båda materialen. I tvådimensionella fall divideras med termen $1 - \nu$.

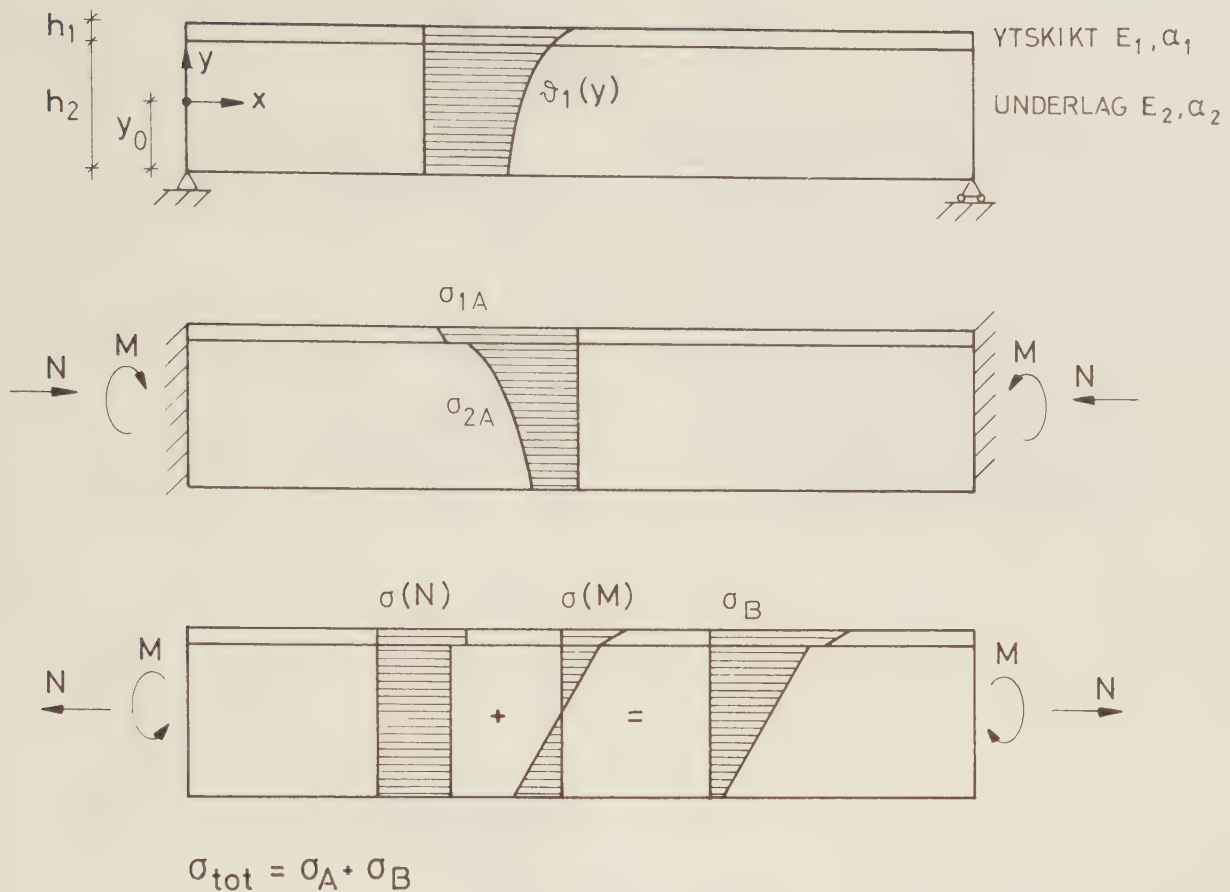
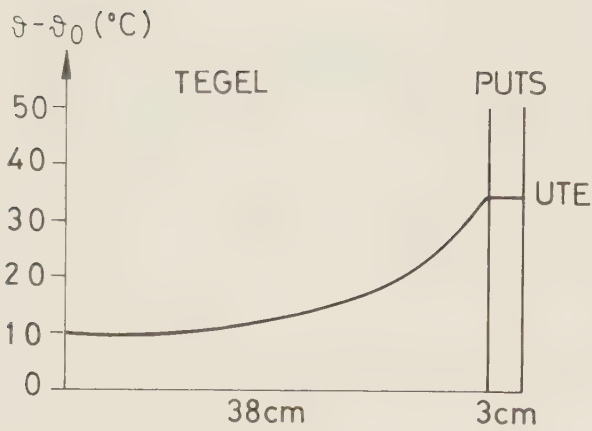
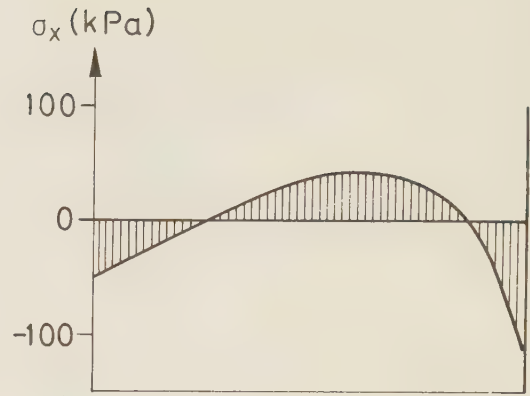


FIG 7.37. Temperaturspänningar i fritt upplagd balk, sammansatt av två material.

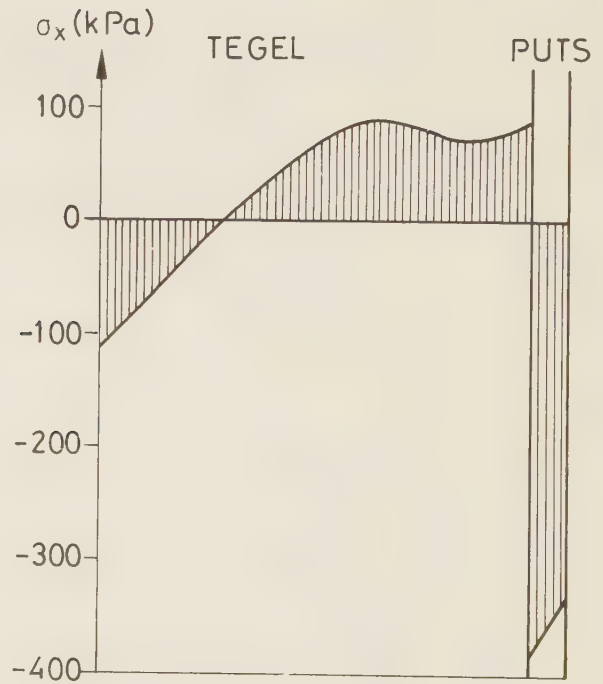
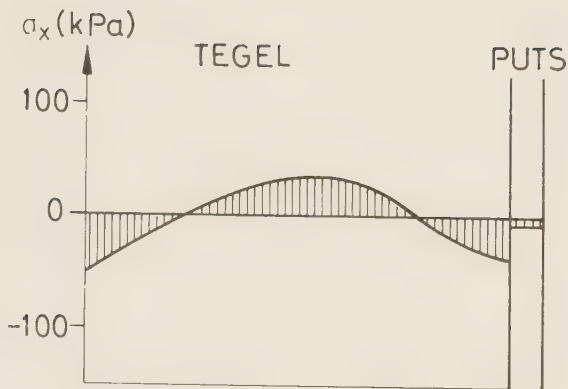
I FIG 7.38 visas finita elementberäkningar av spänningsfördelningen i en 1 1/2-stens tegelvägg för tre olika fall: utan ytskikt, med puts med normal E-modul samt med puts med mycket låg E-modul. Temperaturvariationen är beräknad för södervägg i Stockholm, klart väder, 4/7 kl 13. Eventuell temperaturgradient genom putsskiktet har försummats. Ett ytskikt med hög E-modul som dessutom har hög temperatur kan ha ganska stor inverkan på spänningsfördelningen i underlaget. Detta framgår även av FIG 7.39, som visar samma typ av beräkning för gasbetong med respektive utan puts med normal E-modul. De spänningsfördelningar som visas är normalspänningar på stort avstånd från randen. I närheten av randen uppträder ganska stora skjuvspänningar.



TEMPERATURGRADIENT I FÖRH. TILL $\vartheta_0 = 10^\circ\text{C}$. 4.7 KL 13 STOCKHOLM, SÖDERVÄGG



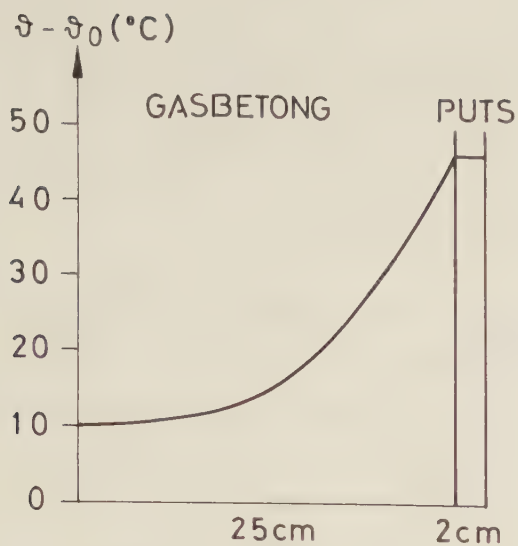
SPÄNNINGSFÖRDELNING I OPUTSAT TEGEL



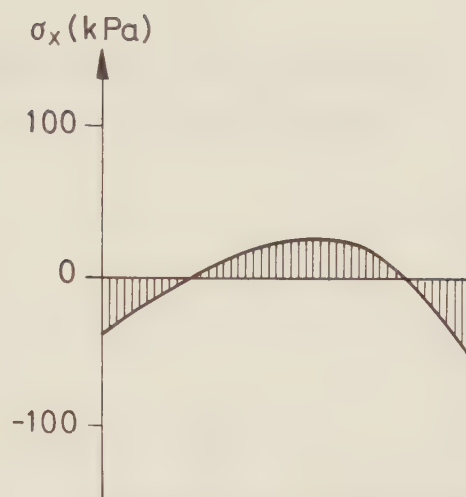
$E_{\text{tegel}} = 2000 \text{ MPa}$, $E_{\text{puts}} = 30 \text{ MPa}$
 $\alpha_{\text{tegel}} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\text{puts}} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

$E_{\text{tegel}} = 2000 \text{ MPa}$, $E_{\text{puts}} = 3000 \text{ MPa}$
 $\alpha_{\text{tegel}} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\text{puts}} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

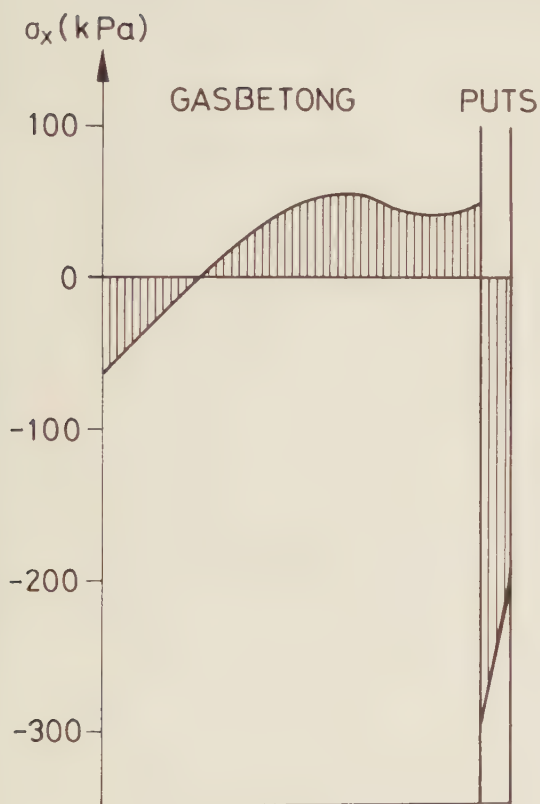
FIG 7.38. Spänningsfördelning på grund av temperaturgradient i putsad och oputsad tegelvägg. Sommarfall med solstrålning. Tvådimensionellt fall.



TEMPERATURGRADIENT I
FÖRH. TILL $\vartheta_0 = 10^\circ\text{C}$, 4.7 KL13
STOCKHOLM, SÖDERVÄGG



OPUTSAD VÄGG
E gasbetong = 750 MPa
 α gasbetong = $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$



E gasbetong = 750 MPa
E puts = 3000 MPa
 α gasbetong = $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
 α puts $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

FIG 7.39. Spänningsfördelning på grund av temperaturgradient i putsad och oputsad gasbetongvägg. Tvådimensionellt fall.

7.6 SPÄNNINGAR PÅ GRUND AV TEMPERATURSKILLNADER MELLAN OLIKA DELAR AV BYGGNADSTOMMEN

7.6.1 Allmänt

Temperaturskillnader mellan delar av stommen som tvingas att samverka medför spänningar. I detta avsnitt kommer spänningar på grund av temperaturskillnader mellan samverkande ytter- och innervägg att behandlas. Vintertid kan temperaturskillnaderna mellan ytter- och innerväggar vara stora, speciellt om ytterväggarna är invändigt värmeisolerade.

Den modell som betraktas i det följande består av en innervägg som i vardera änden är fast förbunden med en yttervägg, enligt FIG 7.40. Ytterväggarna begränsas av symmetrilinjer. Väggarna betraktas som plana skivor. Temperaturgradienter i väggarnas tjockleksriktningar måste därvid försummas.

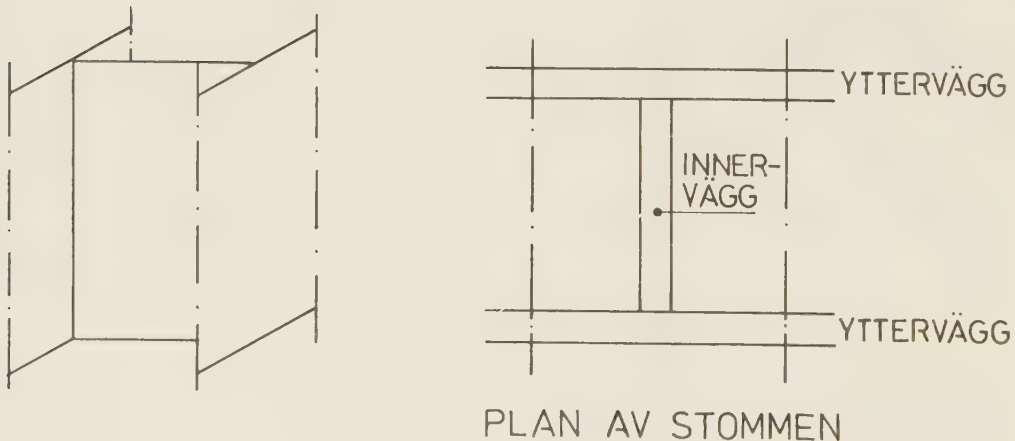


FIG 7.40. Modell av samverkande ytterväggar och innervägg.

Analys av spänningarna i detta system måste göras med en numerisk metod, t ex finita elementmetoden, eller, om kravet på noggrannhet inte är så stort, med ett approximativt förfarande.

Vid analys av fall med temperaturspänningar görs temperaturvariationerna i allmänhet om till s k ekvivalenta laster, vilket diskuterats något i

det föregående. I FIG 7.41 visas principen för lastuppdelning av ett fall med temperaturskillnad mellan yttre- och innervägg.

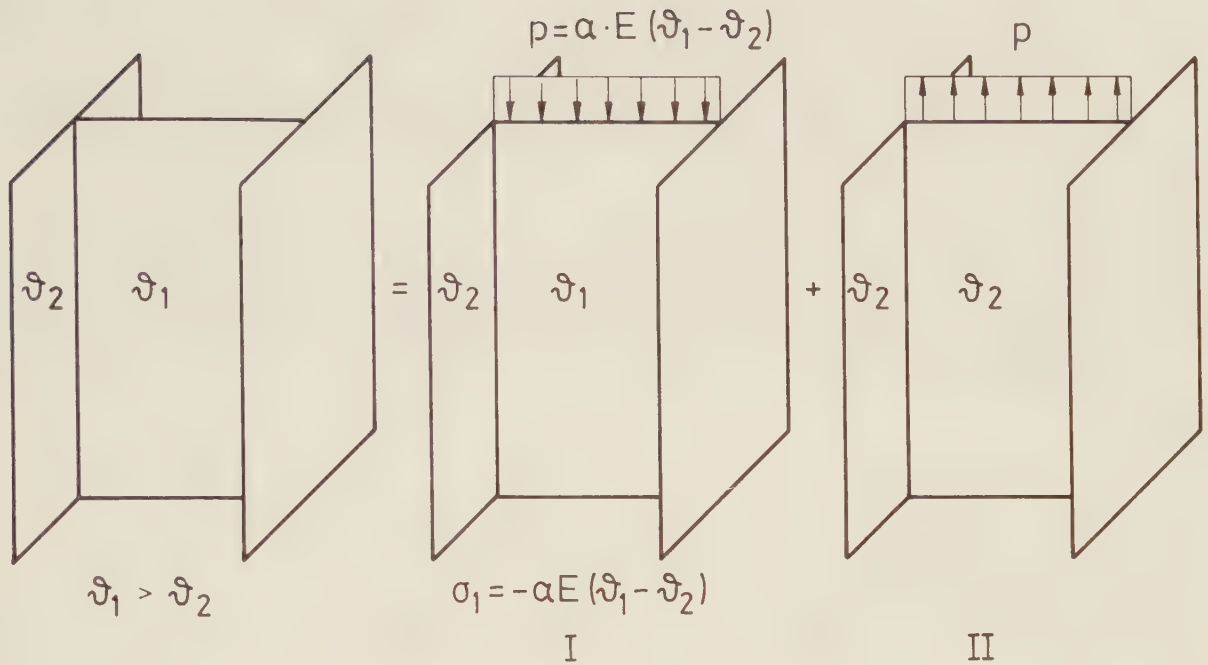


FIG 7.41. Ekvivalenta laster för skivstomme med temperaturskillnad mellan yttre- och innervägg.

Det ursprungliga fallet delas upp i två fall. I det ena fallet är temperaturförhållandena oförändrade, och skillnaden i deformation mellan skivorna motverkas av en linjelast vid innerväggens ovkant. Detta fall ger en normalspänning i innerväggen. I det andra fallet är temperaturen samma i hela strukturen och linjelasten har lagts på vid ovankanten med motsatt tecken som i fall I. Detta lastfall ger skjuvspänningar och normalspänningar.

Spänningsberäkning kan till exempel göras med finita elementmetoden. Sådana beräkningar för fall av denna typ redovisas av Kärrholm och Petersson (1974).

För det aktuella ändamålet, att bedöma inverkan av tilläggsisolering på temperaturspänningarnas storlek, har det inte ansetts lönsamt att göra sådana beräkningar. I stället har valts att uppskatta spänningarna med approximativa uttryck härledda med hjälp av s k strängmetod.

7.6.2 Spänningar beräknade med tvåsträngsmodell

Approximativa uttryck för normal- och skjuvspänningar i skivstommar kan erhållas genom att ersätta stommen med vertikala strängar, som tar upp normalkrafter. Skjuvkrafterna mellan strängarna överförs av membran. Tillvägagångssättet har utförligt beskrivits av Petersson (1971).

Den tidigare betraktade modellen kan delas upp i strängar och membran enligt FIG 7.42. Om strukturen och belastningen är symmetrisk behöver endast två strängar, representerande ytterväggen och halva innerväggen, betraktas.

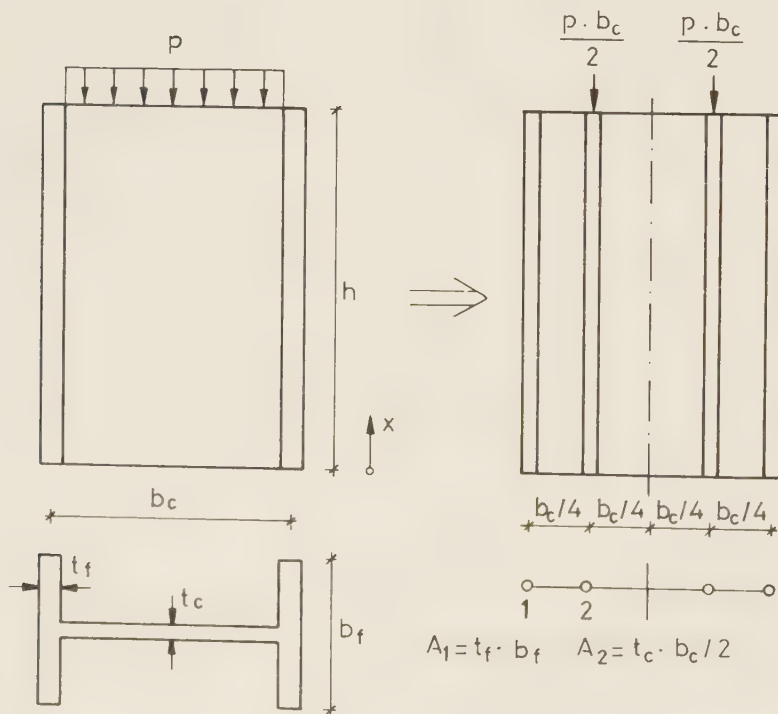


FIG 7.42. Strängmodell av innervägg med anslutande ytterväggar.

Linjelasten vid innerväggens ovkant ersätts med en punktlast på sträng nr 2, $P = p \cdot b_c / 2$.

Uttryck för normalspänningarna i de två strängarna, σ_1 och σ_2 , samt skjuvspänningen i anslutningen mellan skivorna, τ , är

$$\sigma_1 = \frac{t_c \cdot h}{\alpha A_1} \cdot \tau_p \left(1 - \frac{\cosh \alpha x/h}{\cosh \alpha}\right)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{A_2} (P - \sigma_1 A_1)$$

$$\tau = \tau_p \cdot \frac{\sinh \alpha x/h}{\cosh \alpha}$$

där

$$\alpha = h \sqrt{\frac{G t_c}{E b_c} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}\right)}$$

$$\tau_p = \frac{P}{A_2} \cdot \frac{G h_c}{\alpha E b_c}$$

Strängmetoden, utan korrigering, ger för hög skjuvspänning i närheten av skivans ovkant. I FIG 7.43 har antytts det principiella utseendet hos skjuvspänningsfördelningen över höjden av en skiva med utseende som i FIG 7.42, beräknad dels med strängmetod, dels, mera korrekt, med finit elementmetod.

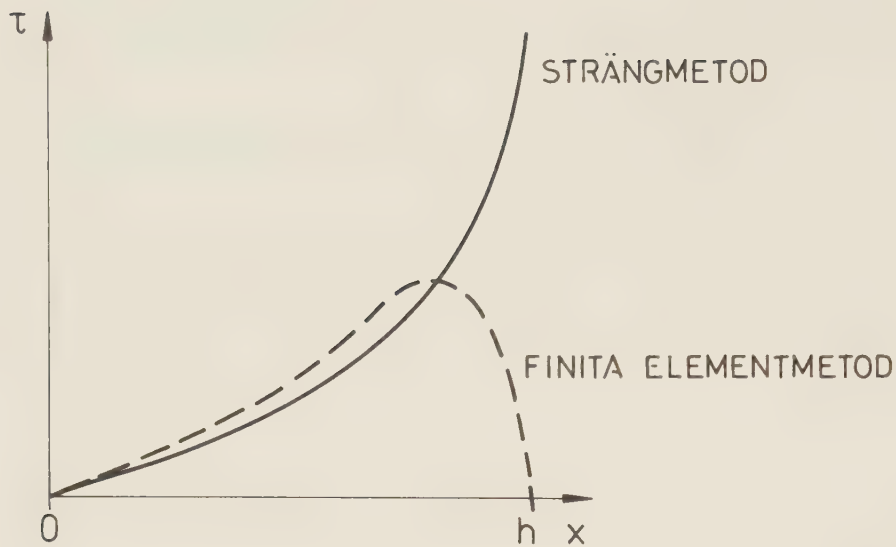


FIG 7.43. Principiell skjuvspänningsvariation över höjden av en skiva, beräknad med finit elementmetod och med strängmetod.

För att få en mera realistisk skjuvspänningsfördelning kan man korrigera det ovan angivna uttrycket för skjuvspänningen med en term som har utseendet $\tau_p \cdot (x/h)^n$ där n är ett tal som är större än eller lika med 1. Beräknade skjuvspänningar minskas med denna term. För att kunna föreslå ett lämpligt värde på n bör man ha tillgång till finita elementberäkningar av spänningar i fall, liknande dem för vilka strängmetoden skall användas. Sådana beräkningar har inte gjorts. Beräkningar gjorda av Petersson (1971) antyder att n bör ha ett relativt högt värde, eftersom korrektionen skall inverka på ett litet område nära skivans ovankant.

För att få en uppfattning om hur stora skjuvspänningar man kan få vid rimliga temperaturskillnader har beräkningar gjorts med de approximativa uttrycken. I FIG 7.44 visas korrigerade skjuvspänningar vid temperaturskillnad 20 respektive 40⁰C mellan ytter- och innervägg. Korrektionstermens grad, n , har här satts till 15.

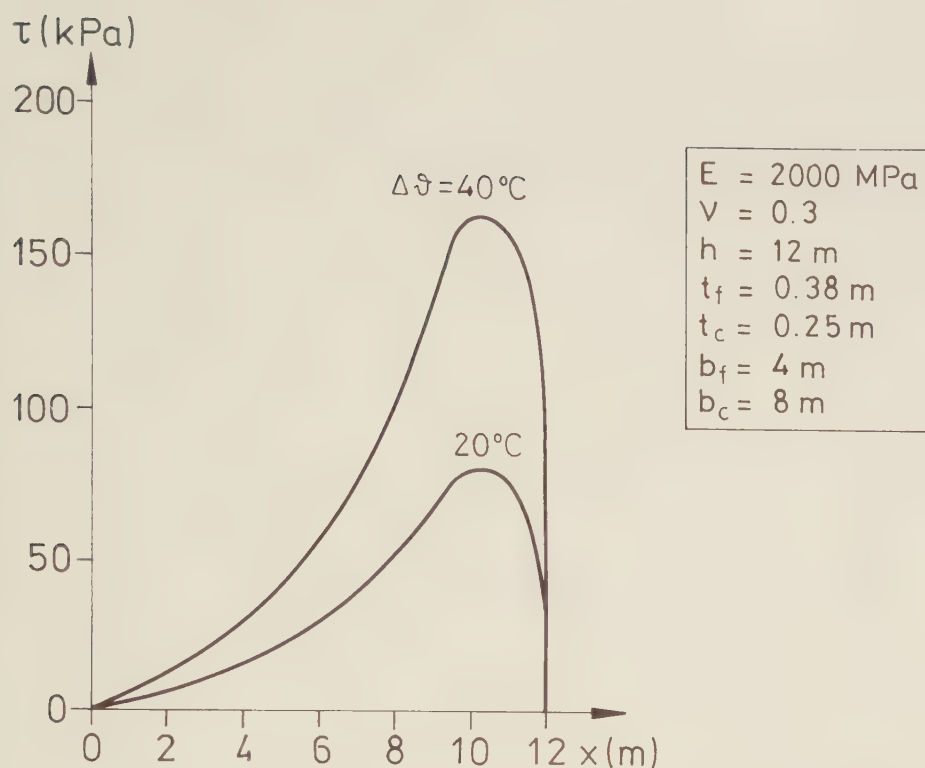


FIG 7.44. Skjuvspänning vid anslutningen mellan ytter- och innervägg vid temperaturskillnad mellan dessa. Beräkningen gjord med tvåsträngsmodell enligt FIG 7.42.

Beräknade skjuvspänningar är direkt proportionella mot temperaturen. Av FIG 1.5 framgår att vid utetemperaturen -20°C och innetemperaturen $+20^\circ\text{C}$ är medeltemperaturen i en $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg utan isolering och med 10 cm invändig isolering ca $-2,5$ respektive $-15,5^\circ\text{C}$. Om innerväggen antas ha rumstemperatur blir skillnaden i medeltemperatur mellan ytter- och innerväggen $22,5$ respektive $35,5^\circ\text{C}$. Tilläggsisoleringen medför då att temperaturskillnaden blir 1,6 gånger större. Detta kan tänkas ge ökad risk för skjuvsprickor i innerväggen.

Skjuvspänningens storlek enligt ovan angivna uttryck minskar med ökande tjocklek hos innerväggen. Ökad höjd hos skivorna inverkar så att skjuvspänningen på samma nivå är större i den kortare skivan. Toppvärdet är ungefär oförändrat vid i övrigt konstanta förhållanden.

Normalspänningarna i de två strängarna har beräknats för ett fall med temperaturskillnaden $36,5^{\circ}\text{C}$ mellan ytter- och innervägg. Detta motsvarar ungefär 15 cm invändig tilläggsisolering av $1\frac{1}{2}$ -stens tegelvägg vid innetemperaturen $+20^{\circ}\text{C}$ och utetemperaturen -20°C . I FIG 7.45 visas dessa spänningar jämförda med normalspänningarna på grund av egenvikt av tegelmurverket. Mått och materialdata är samma som för fallet i FIG 7.44. Egenvikten ger inte upphov till några skjuvspänningar.

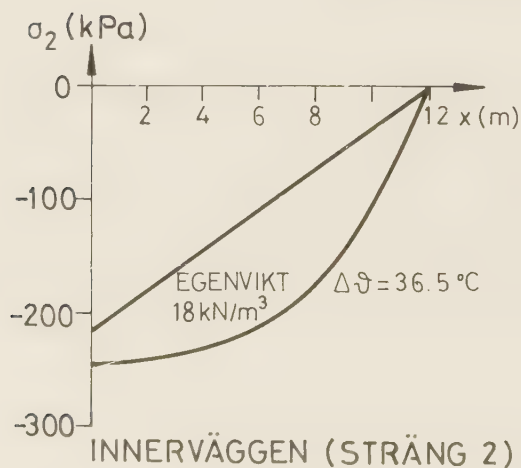
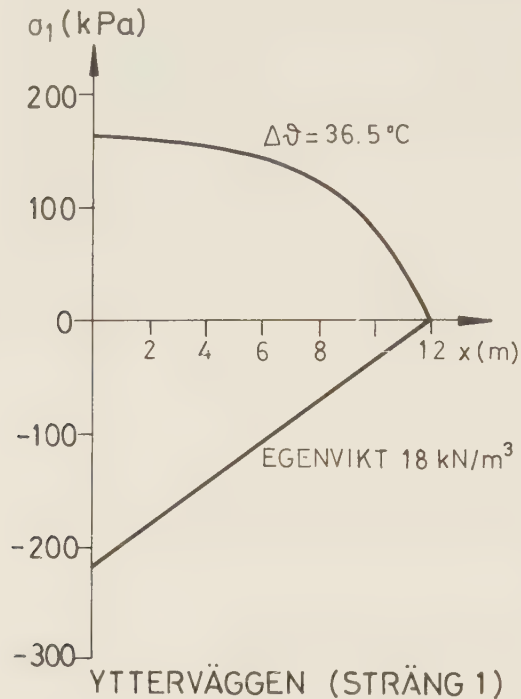


FIG 7.45. Normalspänningar i ytter- och innervägg beräknade med tvåsträngsmodell enligt FIG 7.42.

8 SPÄNNINGAR OCH RÖRELSE PÅ GRUND AV FUKTHALTSVARIATIONER

8.1 FUKTRÖRELSE I BYGGNADSMATERIAL

Fuktrörelserna i ett byggnadsmaterial i naturlig omgivning kan delas in i två delar. Den första delen utgörs av krympning då överskottsfukten, den s k byggfukten, avgår. En del av denna består av fritt vatten vilket är bundet med små krafter och avgår utan betydande volymändring hos materialet. När det fria vattnet försvunnit medför ytterligare avdunstning volymändringar. Vatten som är kemiskt bundet avgår inte utan att stora energimängder tillförs.

Den andra delen av fuktrörelserna består av årstidsvarierande svällnings- och krympningsrörelser, som beror av klimatvariationerna.

Nylund (1968) anger ett uttryck för fuktrörelsernas årsvariation i fasadskivor

$$\varepsilon(\phi) = \frac{\varepsilon_{\ddot{O}} + \varepsilon^U}{2} + \frac{\varepsilon_{\ddot{O}} - \varepsilon^U}{2} \cdot \cos \frac{\pi}{6} (i - m) - \varepsilon_0(\phi)$$

$\varepsilon_0(\phi)$ = rörelse vid referenstillstånd

i = nummer för månad då största fuktrörelsen uppträder

m = nummer för aktuell månad

$\varepsilon_{\ddot{O}}$ och ε^U uppskattas med hänsyn till största och minsta relativa luftfuktighet under året.

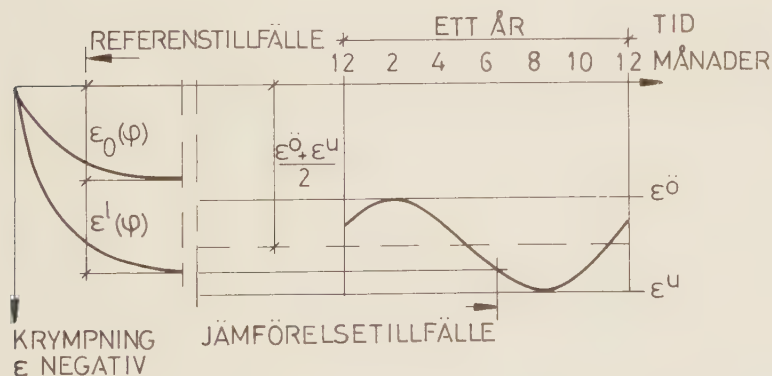


FIG 8.1. Fuktrörelser efter några år i förhållande till referenstillståndet. Källa: Nylund (1968).

Förhindrade fuktrörelser orsakar spänningar och fukthaltsgradienter kan ge upphov till spänningar även om det inte finns några yttre hinder för deformation.

För konstruktioner av hygroskopiska material som påverkas av både ute- och inneklimatet är det inte nödvändigtvis tillräckligt att bedöma fuktrörelserna med utgångspunkt från variationen i uteluftens relativa fuktighet. Allmänt kan fuktrörelsen uttryckas som funktion av fukthalten i materialet, $\epsilon = f(w)$. FIG 8.2 visar det principiella utseendet hos temperatur- och fuktrörelser i cementbundna material.

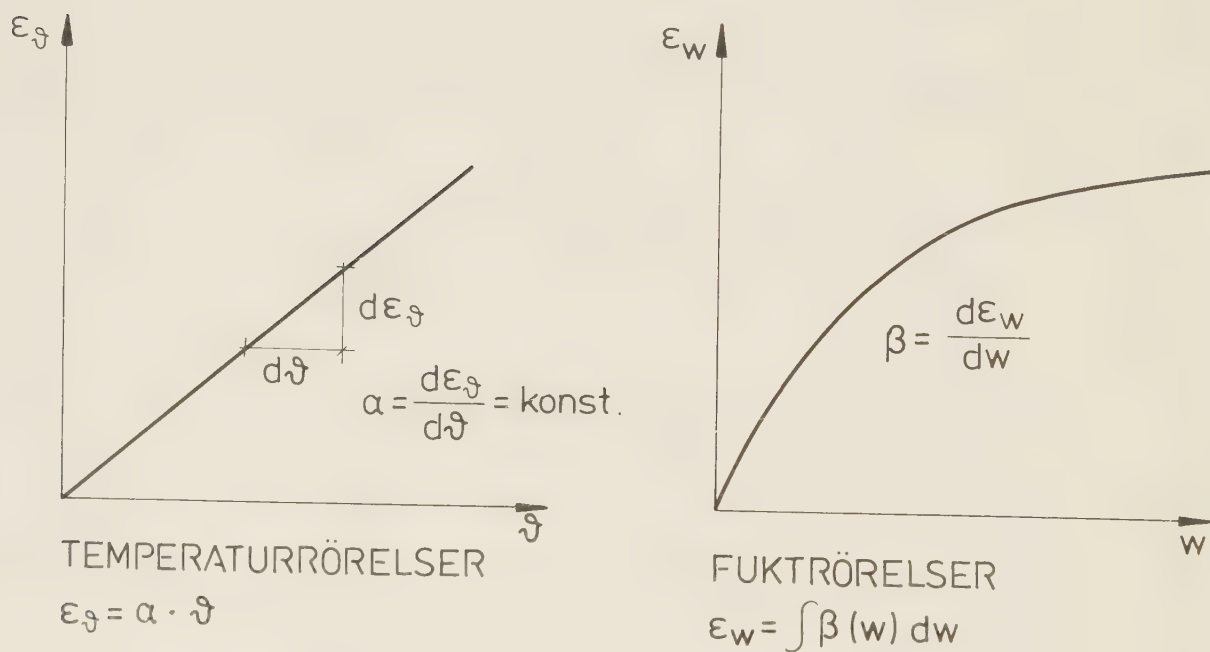


FIG 8.2. Principiellt samband mellan töjning och temperaturändring respektive fukthaltsändring för ett cementbundet material.

I TAB 8.1 visas ungefärliga värden på krympning för några olika material. Av tabellen framgår att fuktrörelserna för tegel är mycket små. Betong och gasbetong har fuktrörelser av ungefär samma storleksordning, men små jämfört med de träbaserade materialen.

TABELL 8.1. Ungefärliga uppgifter om krympning hos olika byggnadsmaterial.
Källa: Bergström et al (1970).

Material	Krympning %	Anmärkning
Trä // fibrer	0,1 - 0,35	Från rått till absolut torrt tillstånd
Trä radiellt	2,0 - 8,5	"
Trä tangentiellt	4,0 - 14,0	"
Trä, <u>volym</u>	7,0 - 21,0	"
Plywood		
längd	0,25	Från 90 till 0% rf
tjocklek	6	"
Spånskiva		
längd	0,4	"
tjocklek	6,5	"
Träfiberskiva (byggboard)		
längd	0,5	"
tjocklek	9,5	"
Betong	0,03 - 0,06	Från vattenmättnad till 50% rf
Högtrycksånghärdad gasbetong	0,02 - 0,06	Från vattenmättnad till 43% rf
Tegel	0,0005 - 0,001	Från vattenmättnad till rumsluft

Purins (1969) har undersökt fuktrörelserna hos bl a tegelstenar och gasbetong. I FIG 8.3 och 8.4 visas sambandet mellan fuktinnehåll i murstenar, relativ luftfuktighet och deformation för två tegelsorter respektive tre gasbetongkvaliteter.

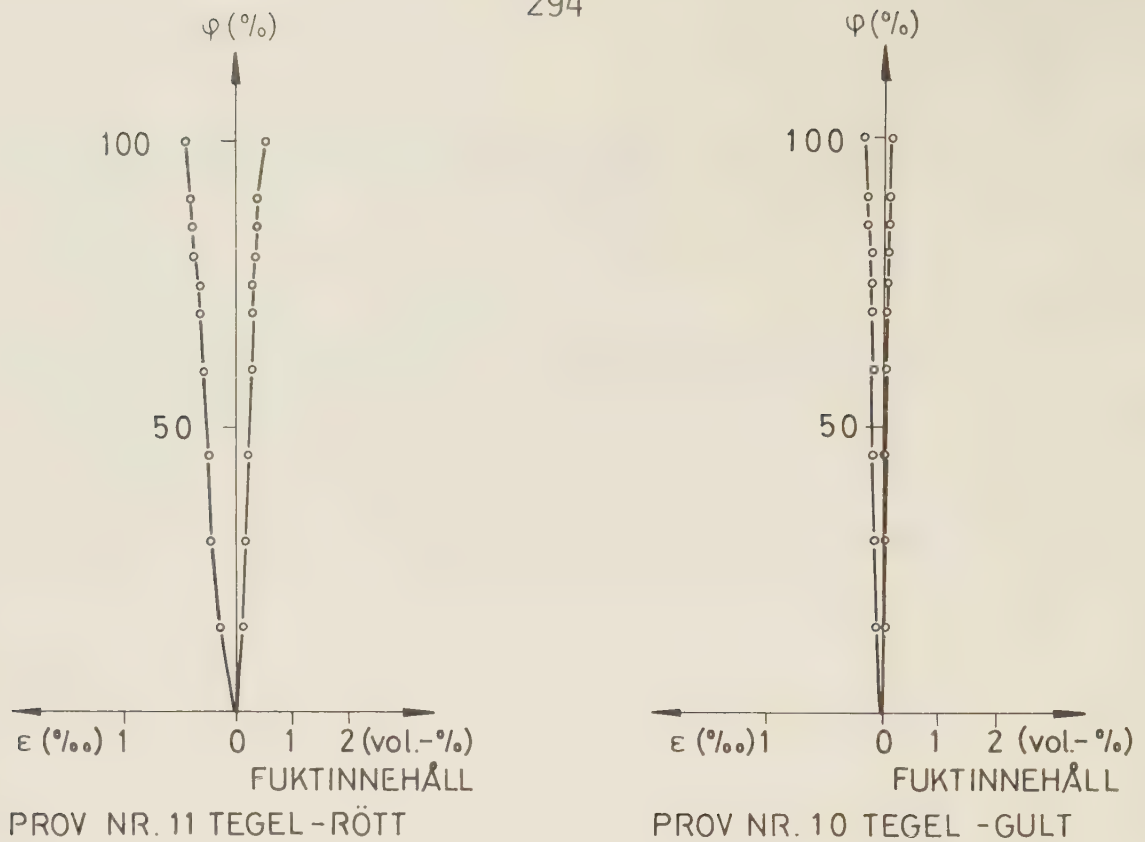


FIG 8.3. Fuktrörelse hos två tegelkvaliteter. Efter Purins (1969)

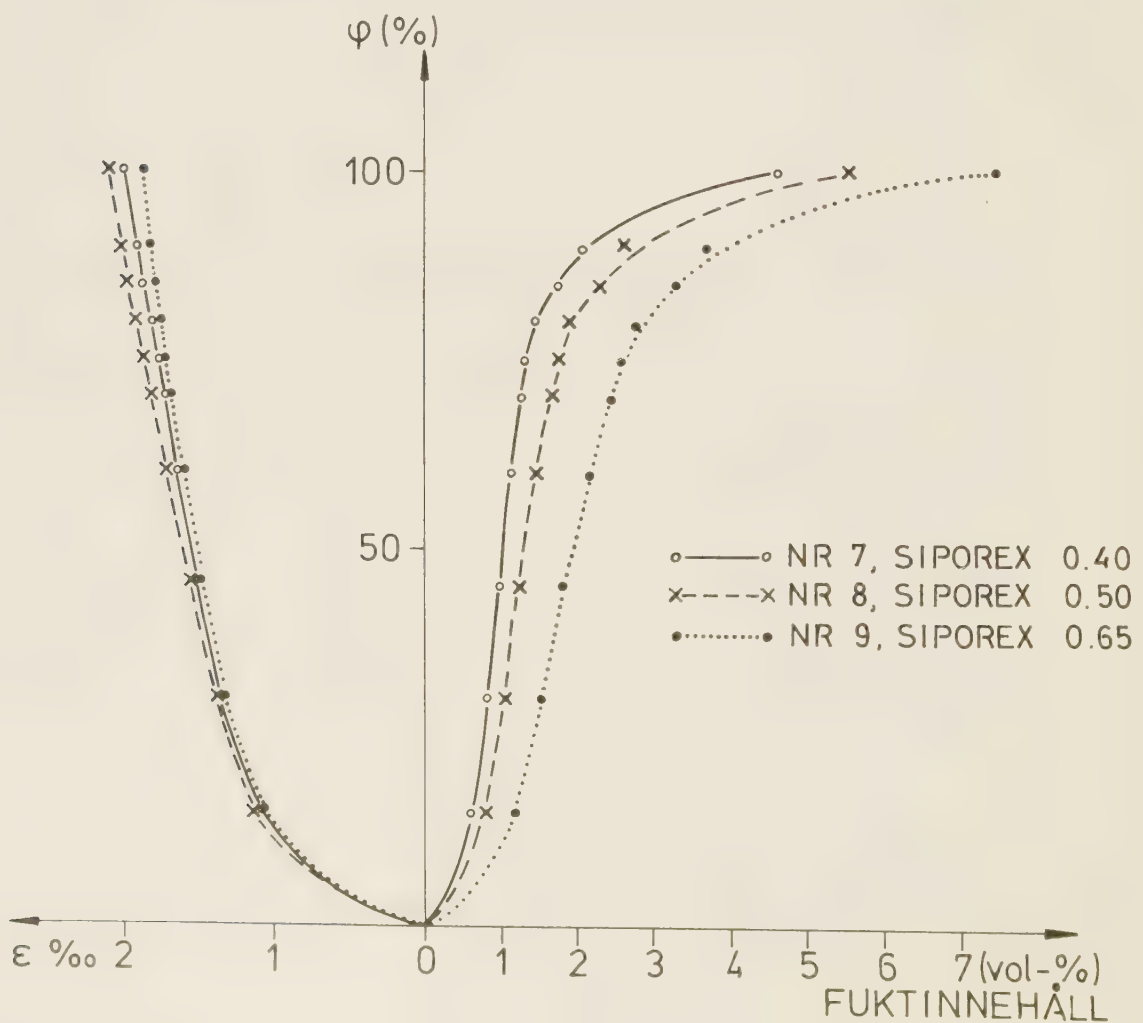


FIG 8.4. Fuktrörelse hos tre gasbetongkvaliteter. Efter Purins (1969).

Karakteristiskt för speciellt gasbetongen är att deformationen ändras betydligt mer med fukthalten vid små än vid stora fukthalter, dvs enligt det principiella förlopp som visades i FIG 8.2. Enligt Purins mätningar på gasbetong är deformationen från uttorkat tillstånd till 100% relativ fuktighet 2 - 2,50/00, dock betydligt högre än vad som angavs i TAB 8.1. Den största delen av krympningen äger rum under det område som gäller för värdet i denna tabell.

Det har, i kvantitativa beräkningar i följande avsnitt, ansetts mest praktiskt att utgå från sambandet mellan fukthalt och deformation. FIG 8.5 och 8.6 visar kurvorna i FIG 8.3 och 8.4 omräknade till detta samband.

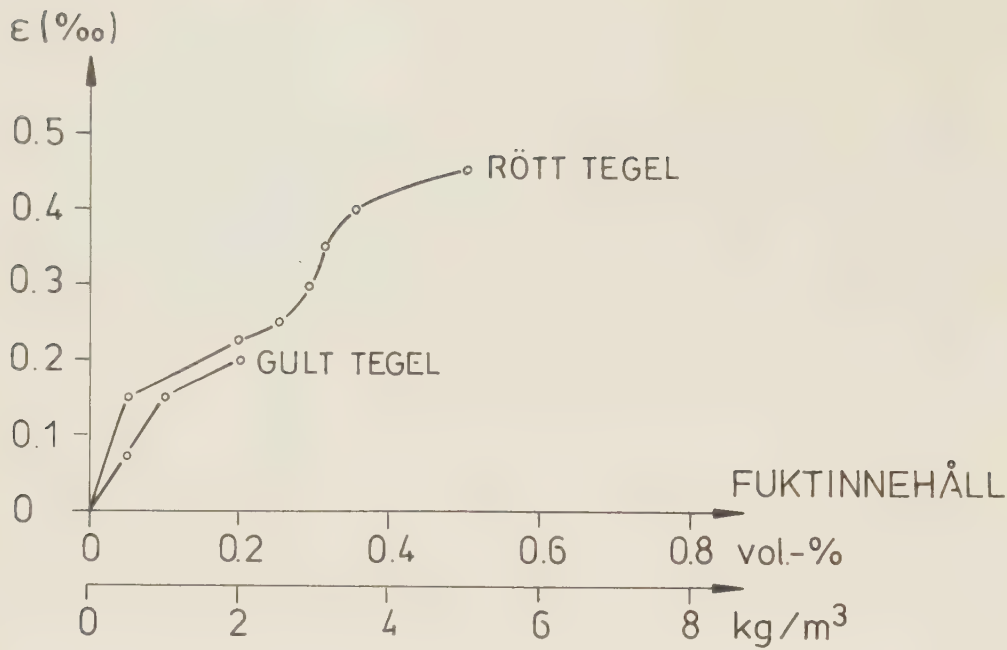


FIG 8.5. Samband mellan fukthalt och deformation för provkroppar av tegel. Beräknat ur FIG 8.3.

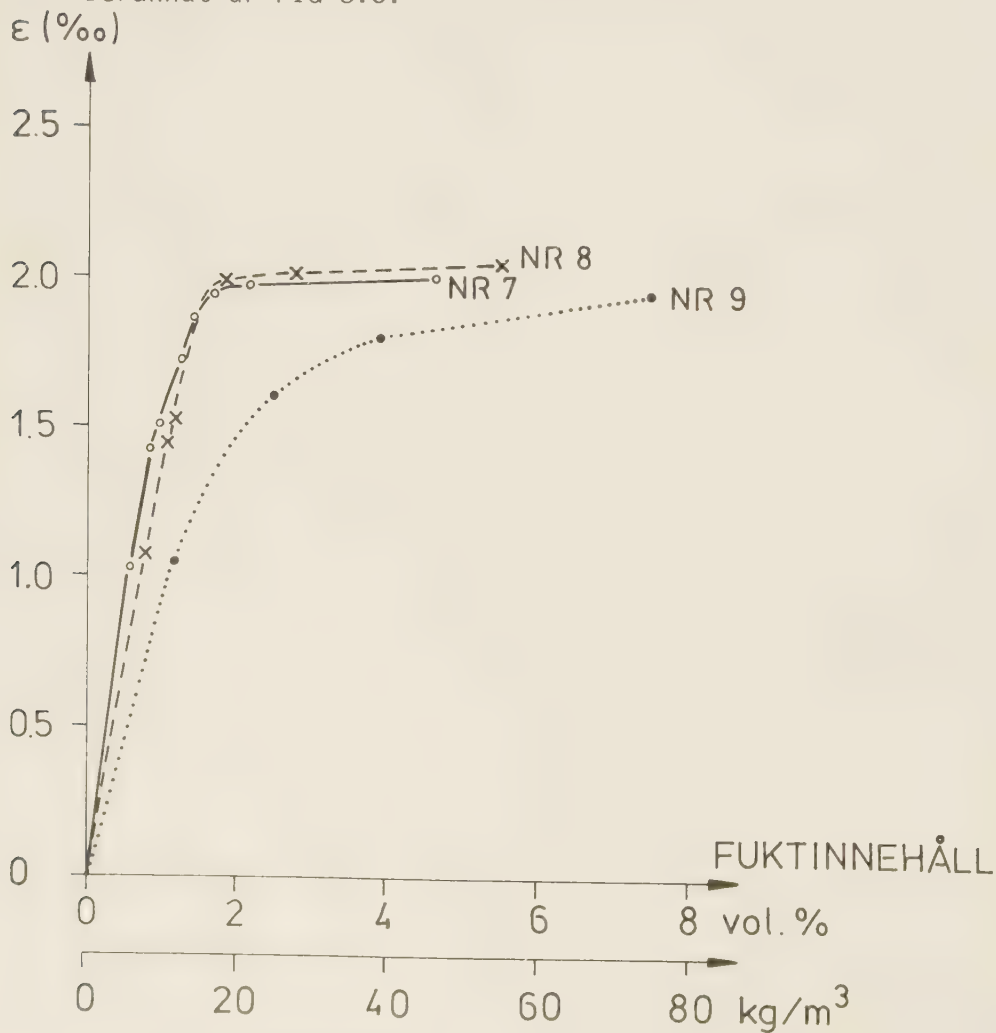


FIG 8.6. Samband mellan fukthalt och deformation för provkroppar av gasbetong. Beräknat ur FIG 8.4.

Fuktrörelserna kan approximativt behandlas analogt med temperaturrörelserna om dimensionsförändringen på grund av temperaturändring, $\alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_{\text{ref}})$ ersätts med dimensionsförändringen på grund av fukthaltsändring, $\varepsilon(w) - \varepsilon(w_{\text{ref}})$. Därmed kan sambanden i KAP 7.2 användas.

Vid känd fukthaltsfördelning i konstruktionen och bestämt referenstillstånd kan $\varepsilon(w)$ erhållas ur t ex FIG 8.5 och 8.6.

I KAP 4 redovisades ett antal beräkningar av fuktbalansen i naturligt klimat för oisolerade och tilläggsisolerade väggar. Dessa beräkningar används i fortsättningen för att uppskatta storleken av spänningar och rörelser på grund av fukthaltsvariationer.

I motsats till temperaturvariationer är fukthaltsvariationer mycket långsamma förlopp, i alla fall i de material och klimatförhållanden som det här är fråga om. Dygnsvariationer kan försummas, utom för vissa speciella fall, som t ex vid kraftig solstrålning, och därmed uttorkning, mot en vägg som varit slagregnsbelastad.

I fortsättningen görs försök att beräkna storleken av fuktrörelser och spänningar i tegel- och gasbetongväggar.

De fall som ansetts vara intressanta är

- oisolerad yttervägg
- invändigt tilläggsisolerad yttervägg utan ny ångspärr
- invändigt tilläggsisolerad yttervägg med ny ångspärr
- utvändigt tilläggsisolerad yttervägg.

Eftersom fuktrörelserna i tegel är relativt små har endast enkla uppskattningar gjorts för ett par fall.

Valet av referenstillstånd, det tillstånd då spänningarna förutsätts vara noll, är avgörande för storleken och riktningen (tryck eller drag) av spänningarna. Vid beräkning av fuktrörelser bör inbyggnadsfukthalten vara referenstillståndet. Eftersom byggfukten i konstruktionerna förutsätts vara uttorkad för länge sedan, bör det egentligen finnas en initialspänning, som är en dragspänning. I de betraktade fallen har emellertid referenstillståndet antagits vara medelfukthalten i den oisolerade väggen.

Referensfukthalten har uppskattats med utgångspunkt från fukthaltsberäkningar på oisolerade väggar, FIG 4.10 och 4.20.

Fuktrörelser och temperaturrörelser har förutsatts vara oberoende av varandra. I KAP 8.4 görs ett försök att uppskatta sammanlagd inverkan för olika fall.

8.2 UPPSKATTNING AV FUKTRÖRELSE OCH -SPÄNNINGAR I 1½-STENS TEGELVÄGG

För den oisolerade tegelväggen har referensfukthalten satts till 8 kg/m^3 . FIG 4.10 ger då att den oisolerade tegelväggen skulle vara utsatt för dragspänningar under våren och sommaren. Variationerna i väggens medelfukthalt motsvarar en variation i relativ fuktighet av mellan 65 och 80%. Om FIG 8.3, rött tegel, används för att uppskatta fuktrörelsen, fås att detta skulle kunna medföra en deformation som är ca $0,05 \text{ mm/m}$. Om denna antas helt förhindrad i båda riktningar, fås normalspänningarna

$$\sigma_x = \sigma_z = \frac{E}{1 - \nu} \cdot \epsilon = \frac{2 \cdot 10^6}{1 - 0,3} \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} = 143 \text{ kPa}$$

Då väggen isoleras invändigt med ny ångspärr blir fukthaltsvariationerna i väggen betydligt mindre än före isoleringen. Om isoleringen görs utan ny ångspärr varierar väggens fukttinnehåll kraftigt under året, men variationerna ligger i den övre delen av det hygroskopiska området, samt över detta, dvs i det område där fuktrörelserna troligen är små.

Det är vanskligt att försöka uppskatta fuktrörelserna då materialets egenskaper är så ofullständigt kända. Det är emellertid inte troligt att fuktrörelserna är av någon större betydelse i tegelväggar.

8.3 FUKTRÖRELSE OCH -SPÄNNINGAR I 250 MM GASBETONGVÄGG

I detta avsnitt görs ett försök att beräkna fuktrörelserna i en gasbetongvägg, genom att använda samma modeller som vid beräkning av temperaturspänningar i KAP 7. För sambandet mellan fukthalt och deformation i materialet har använts värden för material nr 8 i FIG 8.4 och 8.6. Fukttinnehåll i konstruktionen för olika fall har hämtats från de beräkningar som redovisats i FIG 4.20. Härvid har bortsetts från det faktum att sorptionsisotermen för gasbetong, som användes vid fuktbalansberäkningarna, inte stämmer överens med den som visas i FIG 8.4. I beräkningarna har endast

sambandet fukthalt-deformation använts och extrapolation av kurvan har gjorts för fukthalter över 55 kg/m^3 .

De modeller som använts för spännings- och deformationsberäkningarna är, på samma sätt som vid beräkningen av temperaturspänningarna

1 Platta med oförskjutbara ränder i x- och z-riktningarna. Fukthaltsvariation endast i tjockleksriktningen (y-riktningen)

2 Platta med fria ränder. Fukthaltsvariation endast i tjockleksriktningen

Referensfukthalten har satts till 25 kg/m^3 . Beräkningarna omfattar ett år vardera. I FIG 8.7 - 8.10 visas beräknade spänningar och rörelser för de fyra fallen i FIG 4.20, oisolerad vägg, vägg med invändig tilläggsisolering med ny ångspärr, vägg med invändig tilläggsisolering 10 cm mineralull utan ny ångspärr och vägg med 10 cm utvändig tilläggsisolering. Ingen hänsyn har tagits till eventuella ytskikt vid beräkning av spänningar och rörelser. Utböjningen i väggmitt har beräknats under förutsättning av att väggfältets mått är $5 \times 8 \text{ m}^2$. Materialdata har antagits som vid temperaturspänningsberäkningarna. I alla figurerna betyder 1 utsidan, 4 centrum och 7 insidan av väggen.

Den oisolerade väggen blir utsatt för ganska stora dragspänningar. Dessa förekommer under vintern i den del av väggen som är närmast rumsluften och orsakas av att väggen torkar ut inåt då luftens ånghalt är låg. Mittutböjningen i väggfältet är mycket stor. Detta beror på att skillnaden i fuktinnehåll mellan väggens in- och utsida är ganska stor, samt att fukthalten vid innerytan är nere i det område där liten ändring i fuktinnehåll medför stor deformation.

Eftersom väggar knappast har fria ränder i verkligheten förekommer givetvis inte så stora utböjningar. Den förhindrade utböjningen medför i stället spänningar.

I väggen som isolerats invändigt med ny ångspärr, finns det också under vissa delar av året ganska kraftig fukthaltsgradient vilket ger upphov till relativt stora rörelser, dock mindre än för det oisolerade fallet.

I väggen som isolerats invändigt utan ny ångspärr är fukthalten för det mesta hög i hela väggen. Variationerna ligger i det område där ändring av fukthalten ger liten deformation, enligt antagna materialegenskaper. Beräknade spänningar och rörelser är därmed mycket små jämfört med förhållandena då väggen är oisolerad.

Den utvändigt isolerade väggen har torkat ut ganska kraftigt efter tilläggsisoleringen. Vintertid motsvarar väggens fukthalt en relativ fuktighet på ca 30% enligt den antagna sorptionskurvan.

I TAB 8.2 har beräknade extremvärden på spänningar och rörelser sammanställts för de fyra betraktade fallen. Av tabellen framgår bland annat att beräknade dragspänningar ökar ganska kraftigt efter utvärdig tilläggsisolering, då väggens ränder förutsätts fasta. För att kunna säga om detta leder till ökad sprickrisk behövs ökad kännedom om materialegenskaper, draghållfasthet och krympning vid låga fukthalter.

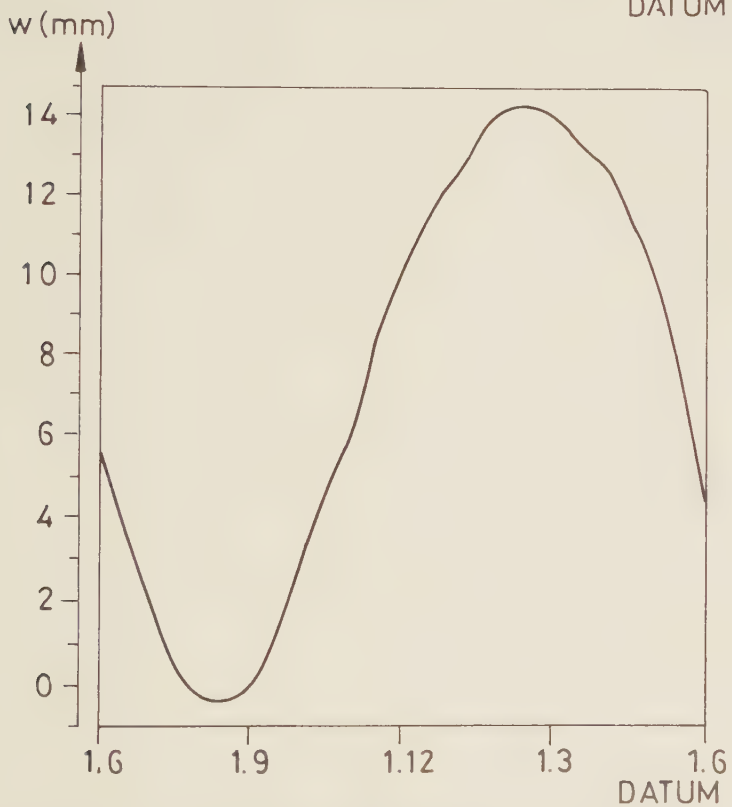
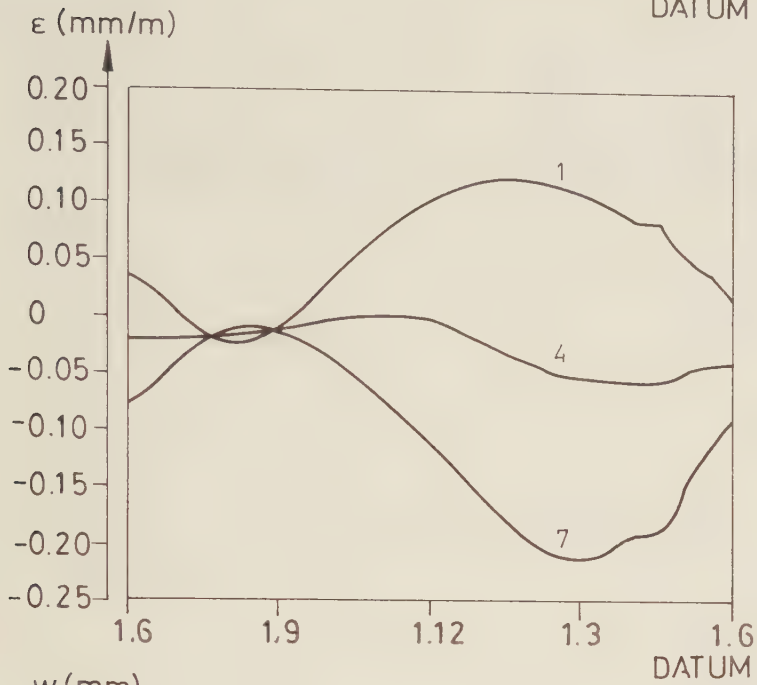
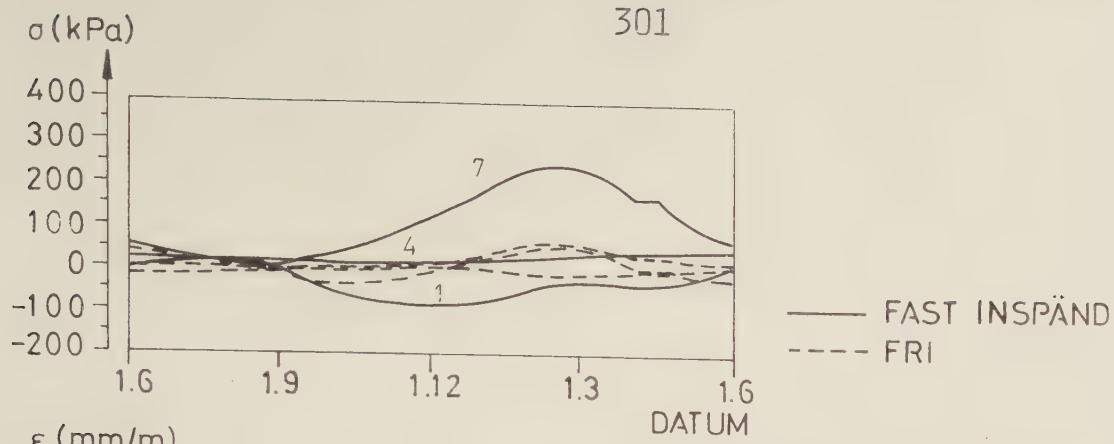


FIG 8.7. 250 mm gasbetongvägg utan tilläggsisolering. Spänningar och rörelser på grund av fukthaltsvariationer under ett år, enligt FIG 4.20.

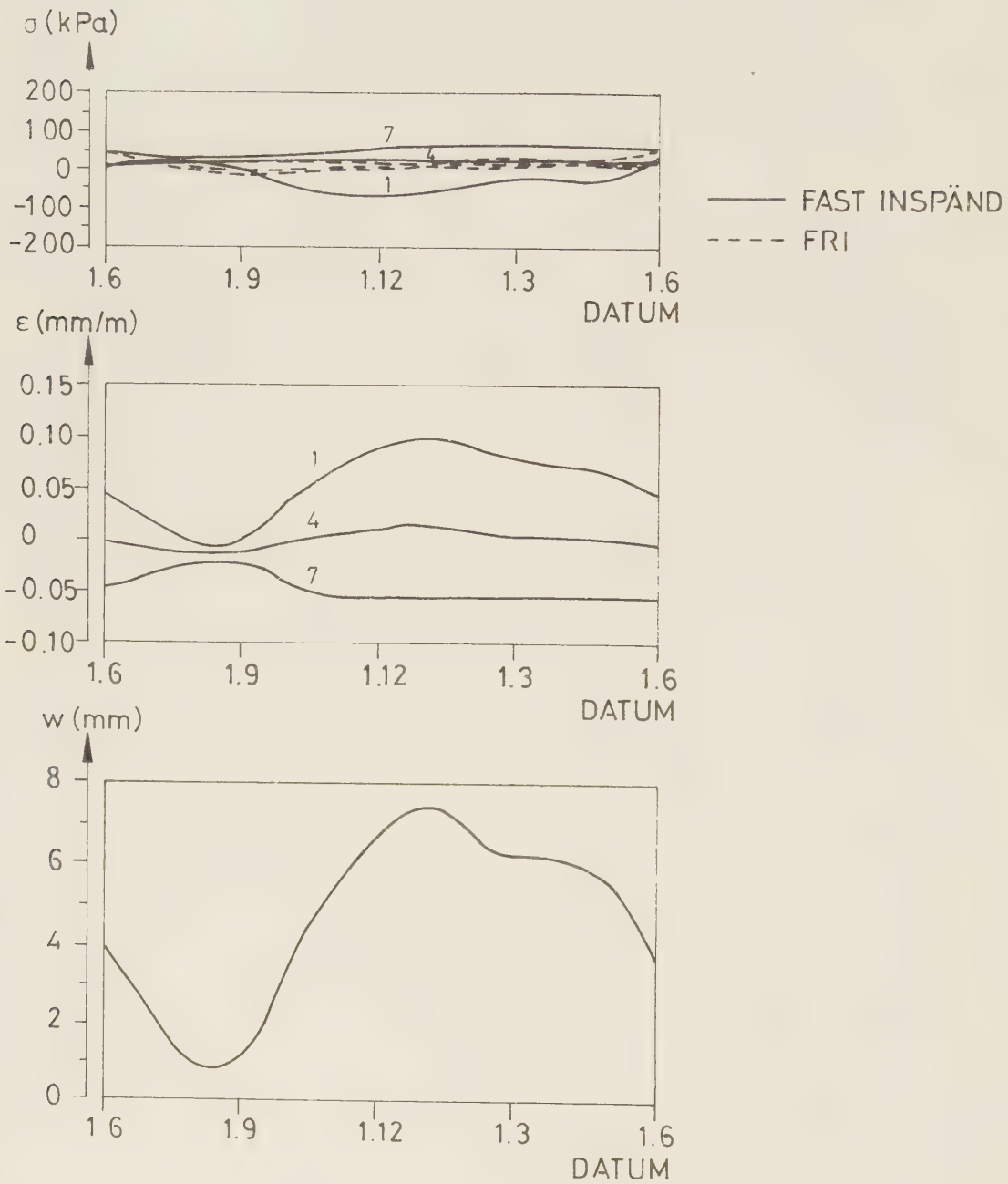


FIG 8.8. 250 mm gasbetongvägg med 10 cm invändig isolering + ny ångspärr. Spänningar och rörelser på grund av fukthaltsvariationer under ett år enligt FIG 4.20.

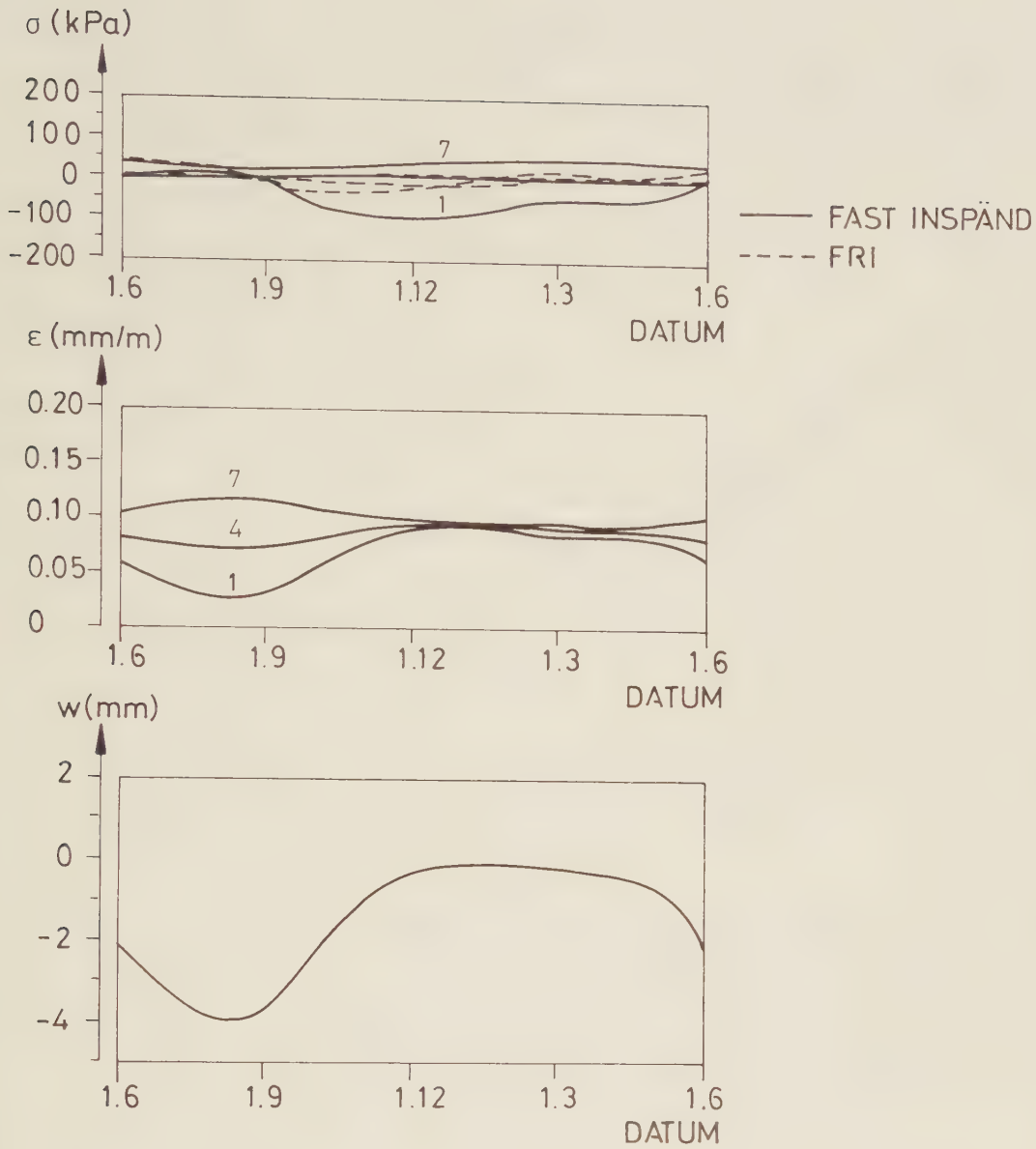


FIG 8.9. 250 mm gasbetongvägg med 10 cm invändig isolering utan ny ångspärr. Spänningar och rörelser på grund av fukthaltsvariationer under ett år enligt FIG 4.20.

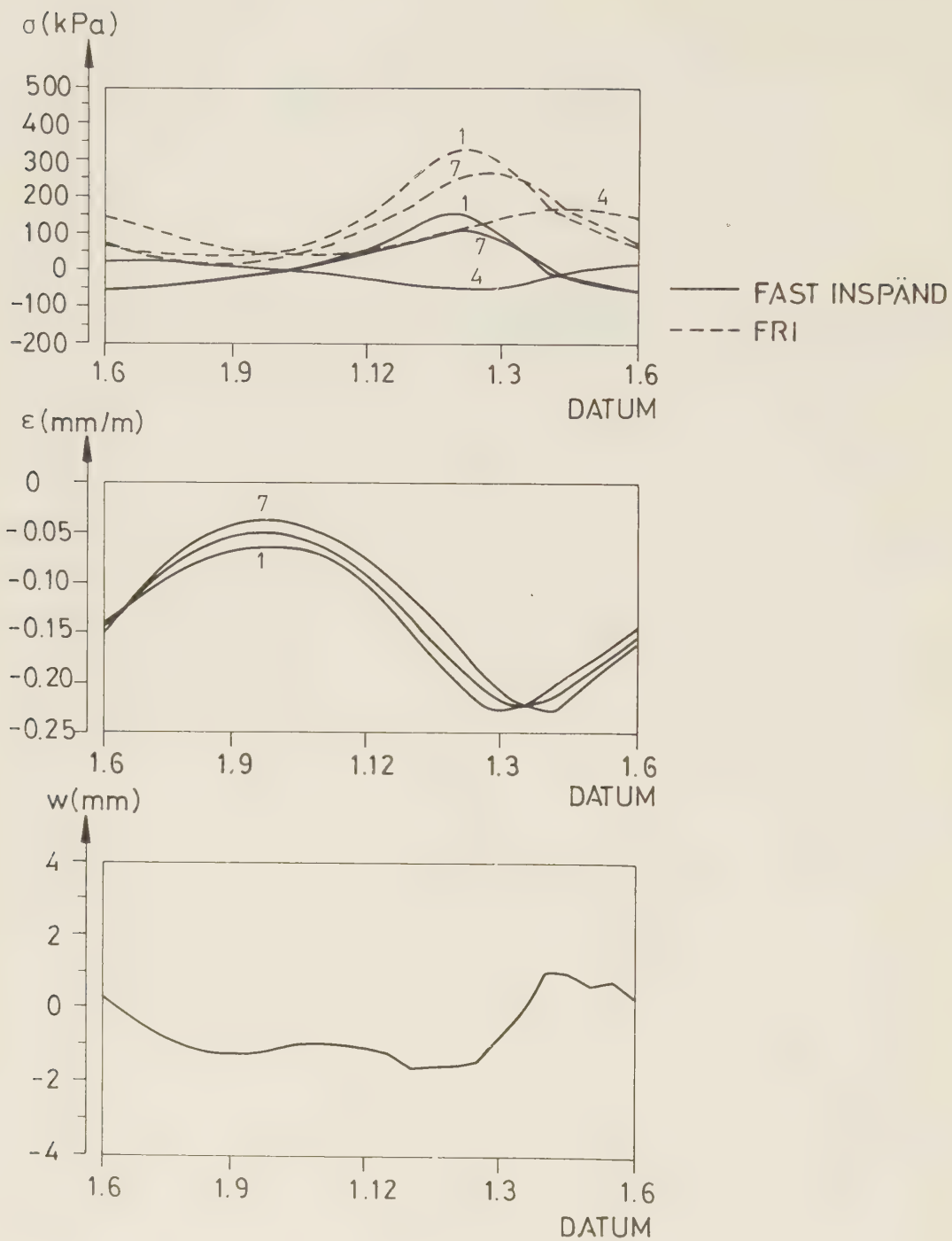


FIG 8.10. 250 mm gasbetongvägg med 10 cm utvändig isolering. Spänningar och rörelser på grund av fukthaltsvariation under ett år enligt FIG 4.20.

TABELL 8.2. Extremvärden av spänningar och rörelser på grund av fukthaltsvariationer i 250 mm gasbetongvägg under 1 år. Referensfukthalt 25 kg/m³.

Fall	Fasta ränder		Fria ränder	
	$\sigma_{\text{drag,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{tryck,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{drag,max}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{tryck,max}}$ (kPa)
Oisolerad	242,3	91,1	63,0	36,4
10 cm inv.isol+ + ångspärr	53,7	94,7	37,7	36,6
10 cm inv.isol. utan ångspärr	15,7	96,9	48,2	25,3
10 cm utv.isol.	332,8	-	158,9	53,7

Fall	Fria ränder					
	ϵ_{max} (mm/m)	ϵ_{min} (mm/m)	$ \epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}} $ (mm/m)	w_{max} (mm)	w_{min} (mm)	$ w_{\text{max}} - w_{\text{min}} $ (mm)
Oisolerad	0,118	-0,213	0,331	14,50	-0,46	14,96
10 cm inv.isol+ ångspärr	0,095	-0,072	0,167	7,40	0,72	6,68
10 cm inv.isol. utan ångspärr	0,122	0,031	0,091	-0,23	-4,02	3,79
10 cm utv.isol.	-0,039	-0,230	0,191	1,08	-1,59	2,67

Beräkningar av slagregnets inverkan på fuktinnehållet i ytterväggar visar att en vägg som är utsatt för slagregn ständigt bör ha ett mycket högt fuktinnehåll, ofta betydligt över det hygroskopiska området. Eftersom fuktrörelserna då i allmänhet är mycket små har det inte ansetts intressant att försöka göra några kvantitativa beräkningar av detta.

8.4 SAMTIDIG INVERKAN AV TEMPERATUR- OCH FUKTVARIATIONER

Temperatur- och fuktrörelser har antagits vara oberoende av varandra. Detta medför att spänningar och rörelser i ett sammansatt tillstånd med både fukt- och temperaturpåverkan kan beräknas som summan av de enskilda delarna. Till exempel kan totala relativa längdändringen beräknas som

$$\epsilon_{\text{tot}} = \alpha(\vartheta - \vartheta_{\text{ref}}) + \epsilon(w) - \epsilon(w_{\text{ref}})$$

förutsatt att inga hinder finns för deformationen och att temperatur- och fukthaltsgradienter i materialet inte ger upphov till böjning.

I FIG 8.11 visas de intressanta klimatvariablernas principiella årsvariation. Utetemperaturen har också en icke försumbar dygnsvariation. Ute-klimatet inverkar även som strålning mot byggnadens yttertor vilket kan beaktas genom en ekvivalent utetemperatur. Dygnsvariationens storlek har endast antytts. Dess årsvariation beror bl a på fasadens orientering.

Fuktrörelsernas dygnsvariation är försumbar. Förutom luftens relativa fuktighet kan slagregn inverka på fuktrörelserna. Denna inverkan är mera slumpmässig och behandlas inte i det följande.

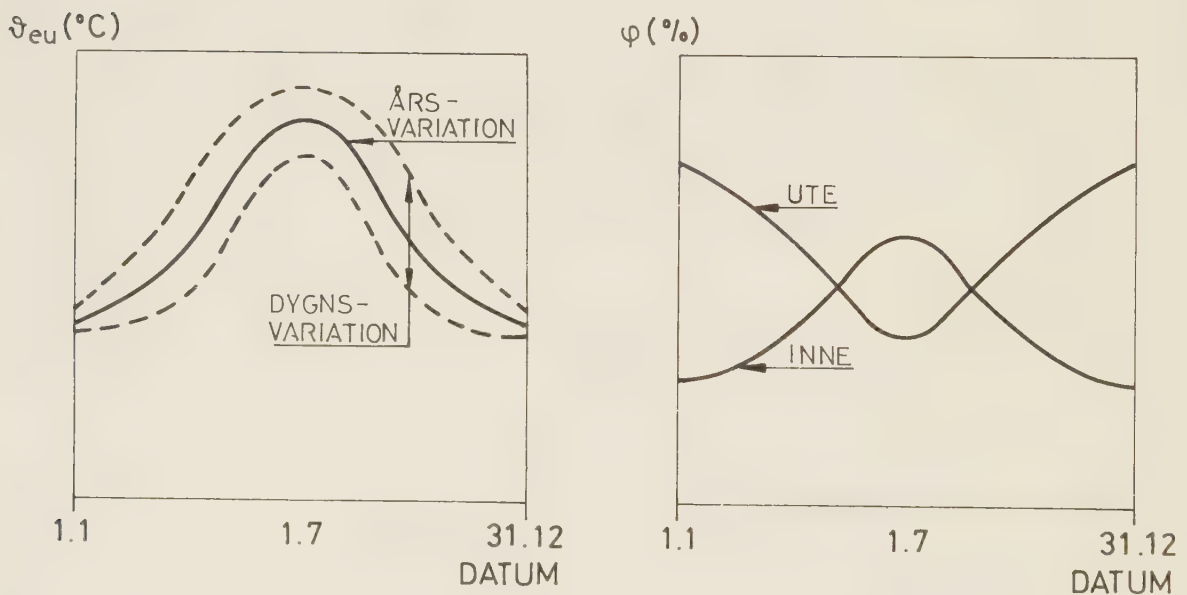


FIG 8.11. Principiell årsvariation av utetemperaturen och relativa fuktigheten utomhus och inomhus.

Hur byggnadsdelarnas rörelser påverkas av klimatvariablerna beror på placeringen av värmeisolering och ångtäta skikt.

I samband med tilläggsisolering av befintliga byggnadsdelar kan man tänka sig nio intressanta kombinationer av värmeisolering och ångtäta skikt. Detta visas i TAB 8.3. För de olika fallen har bedömts sammanlagd inverkan

på totala relativa längdändringen i en byggnadsdel, av temperatur- och fuktvariationer under året. För dygnsrörelser anges endast om de förekommer eller ej. Då temperatur- och fuktrörelser adderats betyder det att deras årsvariationer ser ut på i princip samma sätt, t ex att både fuktrörelser och temperaturrörelser är störst under sommaren och minst under vintern. Den absoluta storleken av rörelserna beror på referenstillståndet.

Böjdeformationer har inte tagits med i tabellen. Dessa kan förekomma vid solstrålning på oisolerade och invändigt isolerade konstruktioner samt vid fukthaltsgradienter. I de utförda beräkningarna (TAB 8.2) har störst böjdeformationer fåtts i det oisolerade fallet. Beräknad utböjning beror mycket starkt på sambandet mellan fuktinnehåll och deformation för materialen.

TAB 8.3 kräver kommentarer. Befintliga byggnadsdelar, t ex murade ytterväggar, utan speciellt ångtäta skikt vare sig ut- eller invändigt är, åtminstone i de delar som är närmast uteluften, starkt påverkade av utetemperaturens variationer. Om deformationerna är oförhindrade utvidgas byggnadsdelen sommartid och krymper vintertid. Fuktrörelsens årsvariation beror av vilken inverkan som är mest dominerande, inneluftens eller uteluftens relativa fuktighet. I de beräkningar som gjorts i KAP 4 har inneluftens relativa fuktighet haft störst inverkan, så att medelfukthalten varit högst under sommaren och lägst under vintern. Detta behöver inte nödvändigtvis vara fallet i alla konstruktioner.

Om den befintliga byggnadsdelen har ett något så när ångtätt skikt på ena sidan fås endast inverkan av antingen inne- eller uteluftens fuktinnehåll. Temperaturrörelserna är opåverkade. Vid ångtätt skikt på utsidan kan kondensation förekomma vintertid vilket kan ha en viss inverkan på fuktrörelserna. Kondensationen kan ha större inverkan på medelfukthalten än variationen hos inneluftens relativa fuktighet. Detta är t ex fallet för den oisolerade källarytternväggen, se FIG 4.26.

Invändigt tilläggsisolerade byggnadsdelar får temperaturrörelser som i stort sett följer utetemperaturens variation. Utan invändigt ångtätt skikt blir fukthalten hög vintertid, med eventuell kondensation, dvs fukt- och temperaturrörelser motverkar varandra. Med invändigt ångtätt skikt följer fukthaltens årsvariation principiellt uteluftens relativa fuktighet. Fukt- och temperaturrörelser kommer att motverka varandra. Om man däremot tittar på storleken av fuktrörelsen i förhållande till ett referenstillstånd blir

resultatet större svällning (eller mindre krympning, beroende på referenstillståndets läge) eftersom fukthalten även under sommaren bör vara större för den invändigt tilläggsisolerade än för den oisolerade väggen. Detta framgår t ex av FIG 4.10.

Den utvändigt tilläggsisolerade byggnadsdelen blir praktiskt taget opåverkad av temperaturvariationer hos uteluften. I fallen utan ångtäta skikt respektive med ångtätt skikt på utsidan påverkas fuktrörelserna av inneluftens relativa fuktighet, vilket bör ge krympning under vintern och svällning (eller mindre krympning, beroende på referenstillståndets läge) under sommaren. Krympningen kan troligen bli ganska stor eftersom inneluftens relativa fuktighet kan vara mycket låg vintertid. Om inneluftens relativa fuktighet hindras att påverka konstruktionens fuktinnehåll genom ett ångtätt skikt på insidan (vilket säkert är ett mycket ovanligt fall) kommer rörelsen att följa variationen hos uteluftens relativa fuktighet. Eftersom ånghalten utomhus är lägre än inomhus och byggnadsdelens temperatur är ganska hög och konstant kan relativa fuktigheten, och därmed fukthalten i byggnadsdelen, bli lägre än i föregående fall. Det är dock ganska svårt att tänka sig en konstruktion som fungerar på detta sätt i praktiken.

TABELL 8.3. Sammanlagd inverkan av temperatur- och fuktvariationer på relativ längdändring för olika fall av tilläggsisolering av byggnadsdel.

$\epsilon_{\vartheta, \text{år}}$ = temperaturrörelsens årsvariation

$\epsilon_{w, \text{år}}$ = fuktrörelsens årsvariation

$\epsilon_{\vartheta, \text{dygn}}$ = temperaturrörelsens dygnsvariation

positiv rörelse betyder störst på sommaren och minst på vintern

negativ rörelse betyder minst på sommaren och störst på vintern

	Ingen tilläggs- isolering	Invändig tilläggs- isolering	Utvändig tilläggs- isolering
Inga ångtäta skikt	a) $\epsilon_{\vartheta, \text{år}} + \epsilon_{w, \text{år}}$ b) $\epsilon_{\vartheta, \text{år}} - \epsilon_{w, \text{år}}$ $\epsilon_{\vartheta, \text{dygn}}$	med kondensation $\epsilon_{\vartheta, \text{år}} - \epsilon_{w, \text{år}}$ $\epsilon_{\vartheta, \text{dygn}}$	$\epsilon_{w, \text{år}}$
Ångtätt skikt invändigt (närmast innet luften)	$\epsilon_{\vartheta, \text{år}} - \epsilon_{w, \text{år}}$ $\epsilon_{\vartheta, \text{dygn}}$	$\epsilon_{\vartheta, \text{år}} - \epsilon_{w, \text{år}}$ $\epsilon_{\vartheta, \text{dygn}}$	$\epsilon_{w, \text{år}}$
Ångtätt skikt ut- vändigt (närmast uteluften)	utan kondensation $\epsilon_{\vartheta, \text{år}} + \epsilon_{w, \text{år}}$ med kondensation $\epsilon_{\vartheta, \text{år}} - \epsilon_{w, \text{år}}$ $\epsilon_{\vartheta, \text{dygn}}$	med kondensation $\epsilon_{\vartheta, \text{år}} - \epsilon_{w, \text{år}}$ $\epsilon_{\vartheta, \text{dygn}}$	$\epsilon_{w, \text{år}}$

a) fukthalansen påverkas mest av innetluftens ånghalt

b) fukthalansen påverkas mest av uteluftens ånghalt

För att illustrera resonemanget har sammanlagd inverkan av fukt- och temperaturvariationer beräknats för gasbetongväggen i KAP 8.2. Som jämförelsestorhet har använts normalspänningen i den homogena väggen med fast inspända ränder (som är motriktad längdändringen i TAB 8.3). Spänningen har beräknats i tre olika delar av väggen, utsidan, mitten och insidan. I TAB 8.4 visas detta för fyra tidpunkter under året. Temperaturspänningens dygnsvariation är angiven med största och minsta värdet under dygnet. De tidigare redovisade beräkningarna har använts. Detta är inte helt konsekvent eftersom fukthaltens variationer gäller för klimat i Lund och temperaturspänningarna är beräknade för en södervägg i Stockholm. Principiellt bör dock fukthaltens årsvariation vara samma. Den lägre utetemperaturen kompenseras delvis av den något högre ånghalten. Fukthalten blir dock troligen något lägre i Stockholm.

TABELL 8.4. Exempel på sammanlagd inverkan av temperatur- och fuktvariationer på spänningar i 250 mm gasbetongvägg.

Spänningarna är angivna i kPa.

σ_{ϑ} = temperaturspänningen vid helt förhindrad rörelse. Angivna som
max dygnsvärde/min dygnsvärde

σ_w = spänningen p g a fukttinnehåll vid helt förhindrad rörelse

U = väggens utsida

$\vartheta_{\text{ref}} = 10^{\circ}\text{C}$

M = väggmitt

$w_{\text{ref}} = 25 \text{ kg/m}^3$

I = väggens insida

	2/1			4/4		
	U	M	I	U	M	I
Utan tilläggsisolering						
σ_{ϑ}	90/58	12/6	-60/-60	60/-258	-20/-92	-64/-70
σ_w	-58	2	273	22	15	259
$\sigma_{\vartheta} + \sigma_w$	32/0	14/8	213/213	82/-236	-5/-77	195/189
10 cm invändig mineralull utan ångspärr						
σ_{ϑ}	94/60	42/32	6/-2	62/-258	-4/-78	-30/-60
σ_w	-58	23	22	23	17	18
$\sigma_{\vartheta} + \sigma_w$	36/2	65/55	28/20	85/-235	13/-61	-12/-42
10 cm invändig isolering med ångspärr						
σ_{ϑ}	94/60	43/32	6/-2	62/-258	-4/-78	-30/-60
σ_w	-79	0	26	23	0	31
$\sigma_{\vartheta} + \sigma_w$	15/-19	42/32	32/24	85/-235	-4/-78	1/-29
4/7						
Utan tilläggsisolering						
σ_{ϑ}	-24/-316	-70/-132	-68/-74	6/-294	-48/-110	-66/-72
σ_w	2	3	4	10	0	7
$\sigma_{\vartheta} + \sigma_w$	-22/-314	-67/-129	-64/-70	16/-284	-48/-110	-59/-65
10 cm invändig mineralull utan ångspärr						
σ_{ϑ}	-24/-316	-78/-140	-82/-108	6/-294	-38/-106	-52/-80
σ_w	1	23	22	11	24	2
$\sigma_{\vartheta} + \sigma_w$	-23/-315	-55/-117	-60/-86	17/-283	-14/-82	-50/-78
10 cm invändig isolering med ångspärr						
σ_{ϑ}	-24/-316	-78/-140	-82/-108	6/-294	-38/-106	-52/-80
σ_w	1	-3	3	2	1	6
$\sigma_{\vartheta} + \sigma_w$	-23/-315	-81/-143	-79/-105	8/-292	-37/-105	-46/-74

I exemplet är de fukthaltsberoende spänningarna ofta mycket små. Undantaget är den oisolerade väggen där ganska stora dragspänningar förekommer under våren och vintern. Dessa dragspänningar motverkas i det här fallet av temperaturspänningar eftersom temperaturen i inre delen av väggen är högre än den valda referenstemperaturen.

Allmänt gäller att temperatur- och fukthaltsberoende spänningar kan samverka eller motverka varandra under samma dygn beroende på vilket snitt av väggen som betraktas och temperaturens dygnsvariation.

LITTERATUR

Adamson B. 1970. Byggnadstekniska värmeproblem. Kompendium i byggnadsteknik. Institutionen för Byggnadskonstruktionslära, LTH, Lund.

Adamson B. 1977. Grundläggningsdjup vid extremt kraftigt värmeisolerade bjälklag på jord. Institutionen för Byggnadskonstruktionslära, LTH. Rapport 1977:8. Lund.

Ahlgren L. 1972. Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial. Institutionen för Byggnadsteknik, LTH, Rapport 36. Lund.

Andersen B et al. 1974. Vejrdata för VVS-tekniske beregninger. Referenceår. Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-rapport 89. Köpenhamn.

Andersson A C. 1978. Köldbryggor i tilläggsisolerade ytterväggar. Byggforskningen, Rapport R 46. Stockholm.

Bergström S G et al. 1970. Allmän kurs i Byggnadsmateriallära, LTH, Lund.

Bjerking S-E. 1974. Ombyggnad. Bostadshusens tekniska utförande 1880 - 1940. Byggforskningen, Rapport R 32. Stockholm.

Bomberg M. 1974. Moisture flow through porous building materials. Institutionen för Byggnadsteknik, LTH, Rapport 52, Lund.

Brodén S. 1969. Temperaturfördelningen i ett tvådimensionellt område. Institutionen för Byggnadskonstruktionslära, LTH. Arbetsrapport 1969:1, Lund.

Brown G. 1956. Värmeövergång vid byggnaders yttertor. Statens nämnd för Byggnadsforskning. Handlingar nr 27, Stockholm.

Elmarsson B, Nevander L E. 1978. Puts på tilläggsisolering. En problemanalys. Institutionen för Byggnadsteknik, LTH. Rapport TVBH-3001, Lund.

Fagerlund G. 1972. Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material. Institutionen för Byggnadsteknik, LTH, Rapport 34, Lund.

- Granholm H. 1971. Om frostens nedträngande i marken med särskild hänsyn till möjligheten att förhindra tjälskador. CTH. Handlingar, nr 332, Göteborg.
- Hast N. 1949. Byggnadsmateriallära. Byggnadstekniska Institutionen, KTH, Stockholm.
- Hernelind J, Pärletun L G, Resmark M. 1977. EUFEMI-manual. Institutionen för Hållfasthetslära, LTH, Lund.
- Hoppestad S. 1955. Slagregn i Norge. Norges Byggeforskningsinstitut. Rapport nr 13, Oslo.
- Höglund I, Johnsson B. 1976. Byggnadstekniska och installationstekniska åtgärder för energibesparing i äldre byggnader. Institutionen för Byggnadsteknik, KTH. Meddelande nr 108, Stockholm.
- Kollmar A, Liese W. 1957. Die Strahlungsheizung. München.
- Kärrholm G, Petersson H. 1974. Stresses in wall structures subjected to vertical loads. Department of Building Construction, CTH, Göteborg.
- Nevander L E. 1961. Köldbryggor i väggkonstruktioner. Byggmästaren nr 2, Stockholm.
- Nylund P O. 1968. Rörelser hos fasadelement av betong. Byggmästaren nr 5.
- Nylund P O. 1975. Temperaturrörelser hos fasadskivor. Byggforskningen, Rapport R 60. Stockholm.
- Petersson H. 1971. Vertikalt belastade skivstommar. Spänningar och deformationer beräknade med strängmetod. Byggnadskonstruktion, CTH, Göteborg.
- Plum N M, Jessing J. 1965. Behov for en debat om statistisk forsøgsplanering og verdering. Ingeniørens Ugeblad nr 42.
- Purins E. 1969. Jämviktsfukten vid olika relativa luftfuktigheter och av fuktändringen i materialet orsakade deformationer hos olika byggnadsmaterial. Institutionen för Byggnadsteknik, CTH, Göteborg.

- Sandberg P I. 1970. Icke stationär fukttransport. Beräkningar med dator. Institutionen för Byggnadsteknik, LTH, Rapport 16, Lund.
- Sandberg P I. 1971. Samtidig ångdiffusion och luftströmning genom ett poröst material. Institutionen för Byggnadsteknik, LTH, Rapport 27, Lund.
- Sandberg P I. 1973. Byggnadsdelars fuktbalans i naturligt klimat. Institutionen för Byggnadsteknik, LTH, Rapport 43, Lund.
- Sandin K. 1976. Putzers och ytskikts inverkan på underlagets fukttillstånd. Avdelningen för Byggnadsmateriallära, LTH, Lund.
- Sandin K. 1978. Puts och fuktbalans. Inlägg vid 3. Nordiskt murverkssymposium, Oslo.
- Saretok V. 1957. Puts och putsning. Ett kritiskt litteraturstudium. Statens nämnd för byggnadsforskning. Handlingar nr 29. Norrköping.
- Searle A B. 1960. The chemistry and physics of clays. Benn Ltd. London.
- van Straaten J F. 1967. Thermal Performance of Buildings. Elsevier Publishing Company, Amsterdam - London - New York.
- Vos B H. 1967. Condensation in structures. Report BI -67 -33, IBBC - TNO, Delft.
- Zienkiewicz O C. 1961. The "equivalent load" method for elastic thermal stress problems with particular application to arch dams. The Institute of Civil Engineers, Proceedings.
- Zienkiewicz O C. 1971. The finite element method in engineering science. McGraw Hill. London.

